

**PROTOTIPO ELECTRONICO DIDACTICO PARA EL
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN MOVIL
EN UN MEDIO VISCOSO**



WILLIAM MARIN RAMIREZ
Ma LUCIDIA RENDON CAÑAVERAL

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MAESTRIA EN INSTRUMENTACION FÍSICA
PEREIRA
2009**

**PROTOTIPO ELECTRONICO DIDACTICO PARA
EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN
MOVIL EN UN MEDIO VISCOSO**



WILLIAM MARIN RAMIREZ
Ma LUCIDIA RENDON CAÑAVERAL

Director
Mg. WILLIAM ARDILA URUEÑA

**Trabajo de grado para optar el título de Magister
En Instrumentación Física**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MAESTRIA EN INSTRUMENTACION FISICA
PEREIRA
2009

Nota de aceptación

Firma Director

Firma Jurado

Firma Jurado

Pereira, julio 31 de 2009

*A todos los docentes que con
Sus innovaciones pedagógicas,
Conocimientos y experiencia
Profesional contribuyen a la
Formación de sus estudiantes
Ayudándolos a crecer
Intelectual y espiritualmente.*

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Carlos Cortes Bermúdez. Ingeniero Eléctrico, profesor UTP, por que sin sus aportes y su continua colaboración no habría sido posible lograrse este proyecto.

Segundo Lara Álvarez. Mg. en Instrumentación Física. Por su acompañamiento en la etapa inicial del proyecto, y orientar nuestras dudas cuando fue necesario.

William Ardila Urueña. Mg. en Instrumentación Física, Director del Departamento de Física, Director de la Maestría en Instrumentación Física. Por creer en nuestras capacidades, por sus orientaciones en la realización del proyecto y la oportuna motivación que nos brindo siempre, además por su constante aliento en los momentos más difíciles de este proyecto y no permitir darnos por vencidos en las dificultades presentadas.

Miguel Borja Alarcón. Sociólogo y Miembro del Observatorio de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia por sus aportes en la revisión del texto.

Hugo Armando Gallego. Mg. en Instrumentación Física, profesor UTP, por su colaboración con la publicación del artículo en la revista Ciencia y Técnica.

Nuestras familias por su paciencia, amor y apoyo incondicional.

La UTP, por facilitar los docentes y recursos necesarios para este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	17
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 ESTADO DEL ARTE DE LOS INSTRUMENTOS DE TIPO PEDAGOGICO PARA MEDICIÓN DEL TIEMPO Y CALCULAR VELOCIDAD LIMITE Y VISCOSIDAD	19
2. ESPECIFICACIONES	31
2.1 ESPECIFICACIONES DE LOS SENSORES	31
2.2 ESPECIFICACIONES DEL HARDWARE	31
2.3 ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS DEL SOFTWARE	32
3. DISEÑO ELECTRONICO Y CONSTRUCCION DEL HARDWARE	33
3.1 DESCRIPCION DEL HARDWARE DEL CIRCUITO	34
3.2 DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO	44
3.2.1 Sensores	44
3.2.2 Descripción Del Sistema	46
3.2.3 Sistema De Adquisición De Datos	46
4. DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SOFTWARE	48
4.1 MODO DE OPERACIÓN DEL HARDWARE	48
4.2 MODO DE OPERACIÓN DEL SOFTWARE	50
5. RESULTADOS	54

	Pág.
5.1 PRUEBAS AL SISTEMA	65
5.2 PRUEBAS DE REPETIBILIDAD	65
5.3 ANÁLISIS DE DATOS	67
5.4 DIFICULTADES ENCONTRADAS EN EL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	68
RECOMENDACIONES	71
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFIA	75
ANEXOS	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos experimentales de la esfera pequeña	55
Tabla 2. Datos experimentales de la esfera violetica	56
Tabla 3. Datos experimentales de la esfera puntas azules	57
Tabla 4. Datos experimentales adquiridos con viscosímetro rotatorio para glicerina	58
Tabla 5. Datos experimentales adquiridos con cámara de vídeo	60
Tabla 6. Datos experimentales adquiridos con viscosímetro rotatorio para Aceite 80W-90	61
Tabla 7. Datos Experimentales obtenidos en aceite 80W-90 Usando como esfera un balón	62
Tabla 8. Datos Experimentales de la esfera café oscura	63
Tabla 9. Medida de tiempos para 10 lanzamientos con un Balón	66
Tabla 10. Datos Experimentales obtenidos por el prototipo	114
Tabla 11. Tabla de resultados	126

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Regresión lineal de esfera pequeña	55
Gráfica 2. Regresión lineal de esfera violetica	56
Gráfica 3. Regresión lineal de esfera puntas azules	57
Gráfica 4. Regresión lineal de los datos obtenidos con la cámara	60
Gráfica 5. Regresión lineal del balón en aceite	62
Gráfica 6. Regresión lineal de la esfera café oscura	63
Gráfica 7. Regresión lineal	115

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Probeta	21
Figura 2. Viscosímetro de bola	22
Figura 3. Montaje Leybold para determinar viscosidad de la glicerina	23
Figura 4. Montaje Experimental	23
Figura 5. Viscosímetro de caída de bola	24
Figura 6. Fotocompuerta que mide la posición de la esfera Versus tiempo	25
Figura 7. Configuración experimental y principio de la medida	26
Figura 8. Viscosímetro profesional de caída de bola	26
Figura 9. Montaje experimental para el estudio de la Ley de Stokes en función de la masa que cae dentro del fluido	27
Figura 10. Dispositivo utilizado para determinar la velocidad en función del tiempo	28
Figura 11. Mecanismo con detector de movimiento	29
Figura 12. Un cilindro Vertical con paredes de radio variable	30
Figura 13. Sistema para medir viscosidad de manera virtual	30
Figura 14. Plaqueta de sensores	31
Figura 15. Diagrama de bloques del hardware	33
Figura 16. Fototransistor	34
Figura 17. Curvas características de un Fototransistor típico	35
Figura 18. Led Emisor IR	35

	Pág.
Figura 19. Led IR y FTR	36
Figura 20. Prototipo visto lateralmente	36
Figura 21. Prototipo ensamblado	37
Figura 22. Tarjeta de acondicionamiento de señal	38
Figura 23. Simulación señal de los sensores	39
Figura 24. Circuito Amplificador de señal	39
Figura 25. Circuito acondicionador de señal	40
Figura 26. Microcontrolador Pic 18F452	40
Figura 27. Memoria SRAM	41
Figura 28. Sistema de Adquisición de datos	42
Figura 29. Pantalla LCD 2X16	42
Figura 30. Sistema de Adquisición de datos e interface serial	43
Figura 31. Hardware del prototipo	43
Figura 32. Conexión sensores	44
Figura 33. Fluctuación de señal	45
Figura 34. Circuito Velocidad limite en fluidos	47
Figura 35. Diagrama de estados del μC	48
Figura 36. Menú Inicial para el manejo del hardware	50
Figura 37. Pantalla Menú Inicial	51

	Pág.
Figura 38. Gráfica de los datos adquiridos en el hardware diseñado	53
Figura 39. Señal esfera pequeña	55
Figura 40. Señal esfera violetica	56
Figura 41. Señal esfera puntas azules	57
Figura 42. Gráfica de la señal del balón del Aceite 80W-90	62
Figura 43. Señal de la esfera café oscura	63
Figura 44. Simulación de la caída del balón usando Stokes	64
Figura 45. Simulación de la caída de la esfera pequeña usando Stokes	65
Figura 46. Prototipo sin ensamblar	85
Figura 47. Prototipo ensamblado	86
Figura 48. Motor a pasos	88
Figura 49. Menú principal del prototipo	89
Figura 50. Dispositivo que recibe las esferas	89
Figura 51. Conector Leds IR	90
Figura 52. Tablet de Leds Emisores IR y Fototransistores FTR	90
Figura 53. Fuente de Voltaje	91
Figura 54. Cable serial	91
Figura 55. Señal que muestra dos sensores que no Capturan el paso de la esfera	93
Figura 56. Señal con alta interferencia no es bien clara la toma	93
Figura 57. No hay lectura de los sensores	94

	Pág.
Figura 58. Señal bien definida, todos los sensores Capturan la señal	94
Figura 59. Visualiza directorio actual	103
Figura 60. Pantalla de Inicio Matlab	104
Figura 61. Icono GUIiDE	105
Figura 62. Ventana de Inicio de GUI	105
Figura 63. Directorio GUI	106
Figura 64. Inicializando	106
Figura 65. Entorno de diseño GUI	107
Figura 66. Menú principal	107
Figura 67. Inicio	109
Figura 68. Menú principal Microcontrolador	109
Figura 69. Menú Motor	109
Figura 70. SubMenú Motor	110
Figura 71. Menú Adquirir	110
Figura 72. Menú que configura la adquisición de la señal	110
Figura 73. Menú actualizar tiempo de muestreo	111
Figura 74. Indica que se puede Iniciar transmisión serial	111

	Pág.
Figura 75. Pantalla de Transmisión de datos	111
Figura 76. Señal Adquirida	112
Figura 77. Señal lista para medir los tiempos de los picos	113
Figura 78. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo que se desplaza en el seno de un fluido	120
Figura 79. Prototipo velocidad limite en fluidos	123
Figura 80. Menú principal Microcontrolador	124
Figura 81. Menú para capturar la señal en el Pc	124

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. GUIA DEL USUARIO	79
ANEXO B. GUIA DEL ESTUDIANTE	116
ANEXO C. HOJA DE DATOS DEL MICROCONTROLADOR	128
ANEXO D. CODIGO FUENTE DEL MICROCONTROLADOR	131
ANEXO E. PROGRAMA MATLAB	137
ANEXO F. CLASIFICACION DE ACEITES	143
ANEXO G. HOJA DE DATOS FOTOTRANSISTORES	144
ANEXO H. VISCOSIDAD DE ACEITES DE TRANSMISION Y Y DIFERENCIAL	145
ANEXO I. BASE DE DATOS EN CD	
ANEXO J. VIDEOS EN CD	

RESUMEN

El documento presenta los pasos seguidos en el diseño, construcción, y prueba de un dispositivo para visualizar el comportamiento de una esfera que desciende en un medio viscoso y estimar el valor de la velocidad límite. Dicho dispositivo consta de un tubo de vidrio transparente que permite observar el fenómeno de un cuerpo esférico desplazándose verticalmente en un fluido newtoniano viscoso, y de un grupo de sensores ópticos equidistantes que al paso del cuerpo produce cambios en sus características eléctricas. Estos cambios son leídos por un microcontrolador el cual los almacena en una memoria y luego son transmitidos a un PC que recoge y procesa la información. Los datos obtenidos con este dispositivo facilitan la elaboración de graficas de posición-tiempo de gran valor pedagógico cuando se trata de estudiar el movimiento de la esfera con diferentes radios y densidades a través de un fluido viscoso. Se espera que sea útil en la enseñanza de la física en instituciones universitarias y tecnológicas. Con él se busca promover en los estudiantes la curiosidad intelectual, el espíritu investigativo y la aplicación de los conocimientos adquiridos en las clases de física a la solución de problemas reales. Finalmente, también se trata de proyectar la Institución en el área de la física experimental.

ABSTRACT

The document presents the steps followed in the design, construction, and test of a device to visualize the behavior of a sphere that descends in viscous means and to consider the value of the limiting velocity. This device consists of a transparent glass tube is that allows to observe the phenomenon of a spherical body vertically moving in a viscous Newtonian fluid, and of a group of equidistant optical sensors that produces changes in its electrical characteristics at the passage of the body. These changes are read by a microcontroller which stores them in a memory and soon they are transmitted to a PC that collects and processes. The data collected with this device facilitate the elaboration of graphs of position-time of great pedagogical value when it is studied the movement of the sphere with different radio and densities through a viscous fluid. It is hoped that it could be useful in the education of the physics at the university and technological institutions. With it, we one looks for to promote the intellectual curiosity in the students, the investigative spirit and the application of the knowledge acquired in the physics classes to the solution of real problems. Finally, It is tried to project the Institution in the area of the experimental physics.

INTRODUCCION

La realización del presente proyecto de investigación permitió diseñar, construir y probar un prototipo didáctico para analizar y describir el comportamiento de una esfera que se desplaza en un fluido viscoso. El proyecto tuvo como propósito central contribuir al mejoramiento de la enseñanza de la física en la universidad y otras instituciones educativas. Un aporte relevante si se tiene en cuenta el desinterés que sobre los temas asociados con dicho desplazamiento, entre ellos los de velocidad límite e índice de viscosidad, se presenta en los programas curriculares de física. Este desinterés surge, entre otras cosas, por la falta de prototipos didácticos para el estudio del tema y las falencias de los dispositivos actualmente usados, los cuales no posibilitan establecer buenas mediciones y por, ende, no permiten un conocimiento adecuado del asunto.

El análisis de las graficas obtenidas en cada experimento, utilizando el prototipo didáctico diseñado y elaborado en este proyecto de investigación, permite calcular la velocidad límite y determinar el índice de viscosidad de la sustancia utilizada. De esta manera, con el prototipo se logra mejorar la calidad en las medidas de tiempo y desplazamiento, pues cuando se realizan de forma directa usando un cronometro de accionamiento manual, usualmente se generan márgenes de error importantes en el laboratorio de física. Lo cual además ocasiona errores en las reflexiones teóricas sobre los temas vinculados al movimiento de un objeto en un fluido newtoniano viscoso.

En consecuencia, el dispositivo y la guía experimental elaborada posibilitan avanzar en el estudio de un tema descuidado por los docentes de física experimental, como lo muestra el estado de arte sobre la cuestión. El estado de arte ha permitido comprobar que si bien existen modelos implementados con fines didácticos, éstos en su gran mayoría no utilizan dispositivos electrónicos y las herramientas de software que para el manejo de datos brindan los computadores.

El dispositivo fue puesto a prueba variando el radio de la esfera, la densidad de las mismas y el tipo de fluido, con el fin de corroborar los datos y hacer las deducciones pertinentes. El método de investigación utilizado fue básicamente el experimental, a partir de sus pasos clásicos: observación, medición e inferencia de principios. Dicho método permitió deducir que existe una relación directa entre la velocidad límite, la densidad de la esfera, el fluido y el valor del radio de la misma. Relaciones ya establecidas teóricamente en la literatura de la física newtoniana referente a los fluidos, y que ahora ya se pueden comprobar empíricamente en los laboratorios de física utilizando el dispositivo y la guía experimental resultados principales de este proyecto de investigación.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

General

Diseñar y construir un prototipo didáctico electrónico, con elementos económicos factibles, que permita analizar y describir el comportamiento de un móvil que se desplaza en un fluido viscoso, y alcanzar resultados experimentales confiables, utilizando las ecuaciones fundamentales de la mecánica clásica, con el propósito de mejorar la enseñanza de la física a nivel universitario.

Específicos

- Diseñar un experimento para los estudiantes de laboratorio de Física I del pregrado de la UTP, que les permita describir y calcular la velocidad límite y determinar el índice de viscosidad de diferentes sustancias, con resultados experimentales repetibles y exactos, usando ecuaciones conocidas.
- Construir un prototipo electrónico con el fin de incluir en el estudio universitario del tema de movimiento de sólidos en fluidos, una práctica de laboratorio basada en la experimentación no tradicional.
- Determinar el índice de viscosidad de fluidos a partir de la medición de la velocidad terminal de un móvil que se desplaza en un medio viscoso.
- Diseñar e implementar el hardware necesario para el prototipo.
- Diseñar el diagrama de flujo y el código del programa del microcontrolador que implementara el sistema.
- Programar un microcontrolador para el diseño implementado.
- Familiarizar a los estudiantes de pregrado con los aspectos prácticos del trabajo con señales en el ambiente de adquisición y análisis de datos usando un prototipo autónomo
- Elaborar la guía del estudiante que permita realizar la practica en el laboratorio
- Elaborar la guía del usuario que describa el instrumento con el fin de poder realizar su mantenimiento.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ESTADO DEL ARTE DE LOS INSTRUMENTOS DE TIPO PEDAGÓGICO PARA MEDICIÓN DEL TIEMPO Y CALCULAR VELOCIDAD LÍMITE Y VISCOSIDAD

En el laboratorio de Física I las prácticas de laboratorio permiten estudiar el fenómeno de **"caída libre"**. Dichas prácticas se realizan asumiendo alturas relativamente pequeñas, no se tiene en cuenta la fricción del cuerpo con el aire, al igual que la geometría del cuerpo que cae, la viscosidad del aire, la densidad volumétrica del medio circundante, la posición del sol y de la luna, la altura a partir del nivel del mar ni la altitud respecto al ecuador. El desconocimiento de este conjunto de factores lleva a que el fenómeno se estudie de una manera muy ideal, es decir se supone que el cuerpo cae en un "vacío absoluto". Por tanto es posible deducir que esta práctica no se hace con la caída real de los cuerpos, pues en el laboratorio se supone una caída en un medio hipotéticamente ideal. Esto nos lleva a afirmar que la llamada **"caída libre"** no es apreciada por los estudiantes en su enorme complejidad y a valorar la conveniencia de denominar caída libre a la que se produce en el vacío y **caída gravitatoria** a la que se produce en un fluido (líquido o gaseoso).

El prototipo expuesto en este proyecto permite observar el fenómeno de caída gravitatoria de una manera más real al dejar caer un cuerpo en un fluido viscoso. Dependiendo del medio y la esfera utilizada se pueden visualizar muchas características que el fenómeno idealizado no permite. Si además, se tiene en cuenta que en los textos de física en general, el tema de la caída gravitatoria se evita y se trata solamente la caída libre, se puede deducir que los estudiantes no tienen una visión real del fenómeno. Incluso, el análisis del fenómeno de caída gravitatoria al colocar de manifiesto la existencia de una dependencia de la velocidad límite con la densidad del material y con el tamaño del cuerpo, permite llamar la atención sobre el hecho de que Galileo no pudo realizar su famoso experimento desde la Torre de Pisa. Ya que los dos objetos lanzados desde lo alto de la torre tendrían distintas velocidades límite y habrían llegado al suelo en instantes diferentes. Esta objeción al experimento de Galileo ha sido trabajada por diversos autores.¹

¹ <http://intercentres.cult.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Rozamiento-fluido/rozamiento-fluidos.htm>

En la realización de este trabajo, con el propósito de obtener la mayor información acerca del tema y obtener una fundamentación teórica y conceptual, fue necesario consultar libros, revistas, tesis, así como visitar algunas páginas disponibles en la Web, las cuales sirvieron de ilustración para iniciar el proceso de la elaboración no sólo de este documento, sino también para la toma de las decisiones en el diseño del prototipo. Algunos de los textos que prestaron un mayor apoyo teórico y teórico-práctico fueron: Física SerWay, Mecánica. ALONSO, Marcelo, FINN Edward. Mecánica de fluidos para ingenieros. BERTIN, JOHN J. Física I y II. Física para estudiantes de ciencias e ingeniería. HALLIDAY, David, RESNICK Física Conceptual HEWITT, Paul G., Teoría y problemas de dinámica de fluidos HUGHES, William, BRIGHTON John A., Mecánica de los Fluidos. L. Landau y E. Lifchitz.

Es de anotar que los textos y las páginas Web visitadas muestran diferencia en cuanto al nivel de profundización del tema. Algunos dan explicaciones claras, pero sin un fundamento matemático completo, otros hacen las demostraciones respectivas a un nivel avanzado.

La revisión bibliográfica señala que hasta el momento aunque existen modelos implementados con fines didácticos, en su gran mayoría no están instrumentados electrónicamente a través de microcontrolador y no son autónomos. Además en gran número están diseñados para ser utilizados como viscosímetros.

Los trabajos de grado que se han realizado en el área de la instrumentación científica de la Maestría en Física, de la Especialización en Instrumentación Física, de los estudiantes de Licenciatura de Matemáticas-Física y de los proyectos realizados por profesores del Departamento de Física, no han sido suficientes para dotar al laboratorio de ciencias básicas en el tema, ya que la mayoría de los trabajos han estado dirigidos a la instrumentación biomédica. En el área de estudio, hasta el momento, no se conocen propuestas, así como tampoco se encontró en el Laboratorio de Física I de la UTP un equipo didáctico y electrónico para realizar las prácticas de laboratorio para estudiar el tema del ***movimiento de un cuerpo en un fluido viscoso o caída gravitatoria***, que posibilite además demostrar la ley de Stokes.

En páginas Web a nivel comercial se hallaron equipos muy sofisticados electrónicamente, los cuales se utilizan para realizar mediciones más formales de la viscosidad de diferentes sustancias, pero generalmente no permiten visualizar el fenómeno de la partícula desplazándose por el fluido viscoso hasta alcanzar la velocidad límite. Dichos instrumentos son conocidos con el nombre de viscosímetros. Los hay de tubo capilar, de Couette, de Engler, de Ostwald o de

Ubbelohde, de tipo de par, etc. El último, por ejemplo, mide la viscosidad en función del par necesario para hacer girar una paleta vertical sumergida en el líquido. También están los viscosímetros rotatorios, que permiten medir las fuerzas de cizallamiento (fuerza tangencial por unidad de superficie) en el seno de un líquido situado entre dos cilindros coaxiales de radios R_1 y R_2 , uno de los cuales se mueve por un motor, mientras que el otro se desliza debido a la rotación del primero. Este se denomina viscosímetro de Brookfield, de rotovisco o de Stormer. También se encontraron medidores de viscosidad con tubos de burbuja, medidor digital de viscosidad programable, Medidor digital de viscosidad con monitor de temperatura, copa para checar viscosidad en pinturas, entre otros. En general, estos dispositivos sobresalen por su alto costo.

A nivel de los laboratorios de las universidades que publican sus prácticas en la Web podemos encontrar las siguientes prácticas. Una de las mas utilizadas, incluyendo la UTP, UCPR y una de las mas comunes y sencillas halladas en varias páginas web, que no requiere de instrumentos ni materiales sofisticados, es la que mide el tiempo t , que tarda la esfera en descender una altura h a través de una probeta sencilla, empleando un cronómetro; para calcular la velocidad de la esfera en este trayecto y con ella determinar el coeficiente de viscosidad de un líquido, usando la ecuación de Stokes, como comprobación de dicha ley.

El modelo que ilustra la figura 1. Se extrajo de la guía *Física Aplicada: Técnicas Experimentales Básicas* publicada en: www.ugr.es/~andyk/Docencia/TEB/Guiones/09.doc

La práctica publicada en el Departamento de Mecánica de Fluidos de la escuela de Ingenieros Industriales de Terrasa, (U.P.C), con el título: Practica Viscosímetro de bolas –Ley de Stokes, es muy similar a la anterior. Su objetivo es hallar la viscosidad de varios líquidos problema, mediante el viscosímetro de bola. Este consiste en un instrumento formado por un tubo de pequeño diámetro con un ángulo de giro de 180° , que se rellena con el líquido problema y por el que se introduce una bola de diámetro algo menor para calcular la viscosidad del fluido. Se representa en la siguiente figura.

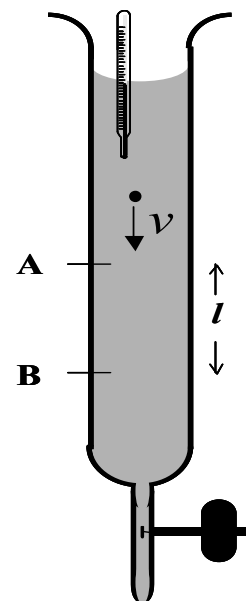


Figura 1. Probeta

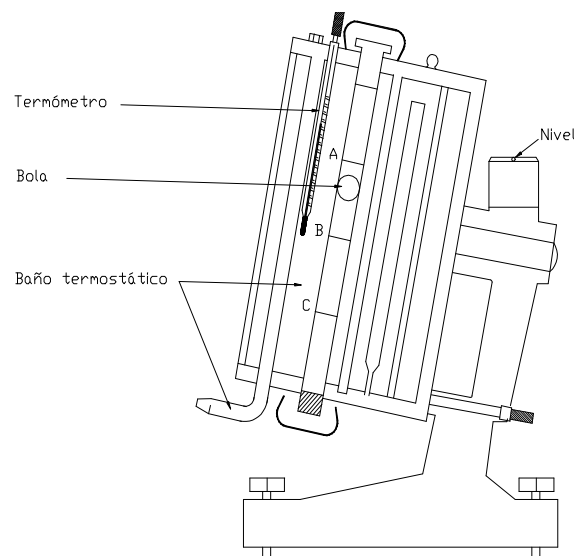


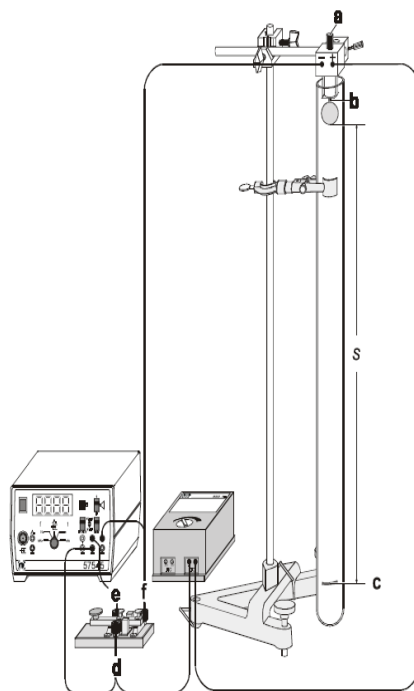
Figura 2. Viscosímetro de bola

En la dirección www.leybold-didactic.com/literatur/hb/s/p1/p1831_s.pdf con el tema Viscosidad mecánica aerodinámica e hidrodinámica LD HOJAS DE FISICA se consultó la práctica cuyos objetivos son: montaje de un viscosímetro de caída de bola y determinación de la viscosidad de la glicerina, al estudiarse este montaje se observó que posee los principios de los anteriores, pero con la variante de usar **un contador electrónico P²**, para determinar el tiempo de caída de la esfera, un imán de retención que permite retener la esfera hasta su lanzamiento, esto determina usar únicamente esferas metálicas, base de soporte, y un par de imanes cilíndricos para subir las esferas. El montaje del equipo se visualiza a continuación en la figura 3.

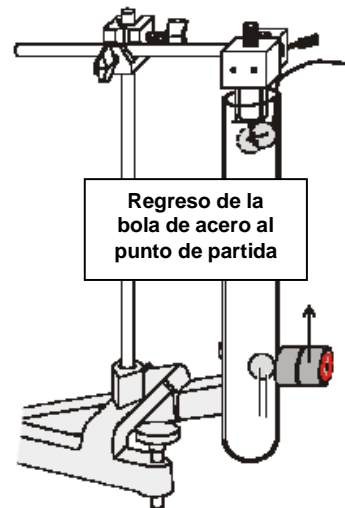
En el documento³ del Departamento de Ingeniería Mecánica - Universidad de Santiago de Chile con el título *modelación del movimiento de un cuerpo rígido en un medio viscoso*, proyecto patrocinado por FONDECYT, los autores Christian Muñoz V., Marcela A. Cruchaga y Diego Celentano. Se proponen el estudio de diferentes modelos numéricos para la descripción del movimiento de una esfera desplazándose por su propio peso en un cilindro que contiene un medio viscoso.

² www.leybold-didactic.com/literatur/hb/s/p1/p1831_s.p

³ [http:// http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/10/48](http://http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/10/48)



**Figura 3. Montaje Leybold
para determinar
Viscosidad de la glicerina**



Se evalúa el efecto en la velocidad terminal de caída de la distancia del cuerpo a las paredes y de su geometría. Se utilizó una probeta graduada de un litro, dos fotoceldas de velocidad y tres esferas de distintos diámetros. El montaje se aprecia en la Fig. 4. La distancia entre las fotoceldas es de 16.77 cm , el diámetro interno de la probeta es 6.16 cm y se usaron esferas de 4.8 mm , 6.5 mm y 7.95 mm , cuyos pesos fueron 0.4 gr , 1 gr y 2 gr respectivamente.

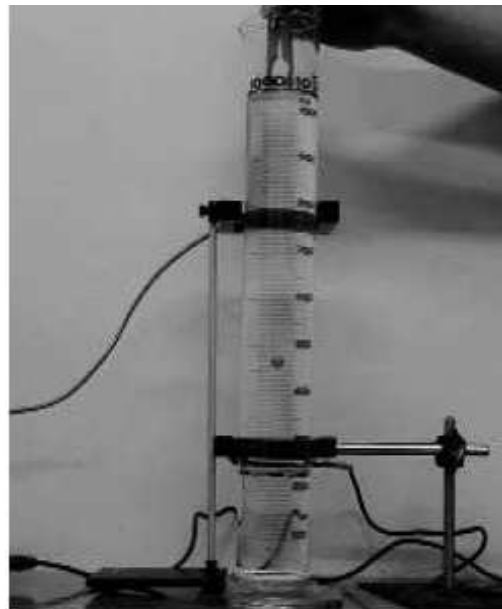


Figura 4. Montaje Experimental

El dispositivo que se relaciona a continuación es otro de los proyectos interesantes encontrados, este fue diseñado en el Instituto Tecnológico de Zacatepec⁴.

El principio de medición del equipo es aquel del viscosímetro de bola convencional, en el cual una esfera pesada se deja caer a través de un fluido ubicado dentro de un tubo rígido colocado verticalmente.

La medición del tiempo de recorrido de la esfera permite estimar la viscosidad del fluido. El movimiento de la esfera metálica será detectado por un sistema de tipo eléctrico-inductivo que comprende diez bobinas enrolladas a lo largo del tubo, equidistantes entre sí y conectadas en serie como indica la figura 5.



Figura 5. Viscosímetro de caída de bola

Este modelo nos llamó inicialmente la atención para diseñar el prototipo. Se trató de implementar, pero al realizar pruebas se encontraron múltiples obstáculos, por lo cual se debió continuar buscando mayor información para realizar el proyecto.

El siguiente aparato fue elaborado por Shan-tarng Chen del Department of Physics, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan. El objetivo de esta investigación es hallar la fuerza de fricción viscosa que actúa sobre una

⁴<http://capistran.blogspot.com/2006/04/proyecto-viscosimetro-de-caida-de-bola.html>

esfera de acero que se desplaza por un fluido viscoso y a la cual se le sujeta a un resorte.

La experiencia se realizó con longitudes diferentes del resorte y con diferentes masas. El equipo usado se visualiza en la figura 6. Esta constituido por un tubo cilíndrico de acrílico de 115 cms de longitud el cual fue llenado con glicerina y colocado en el centro de un montaje de 8 fotocompuertas en forma de "U" con la fotocompuerta superior a 35 centímetros debajo de la superficie del fluido. Y los tiempos en los cuales la esfera pasó por cada posición de la fotocompuerta fueron registrados por el contador del photogate⁵.

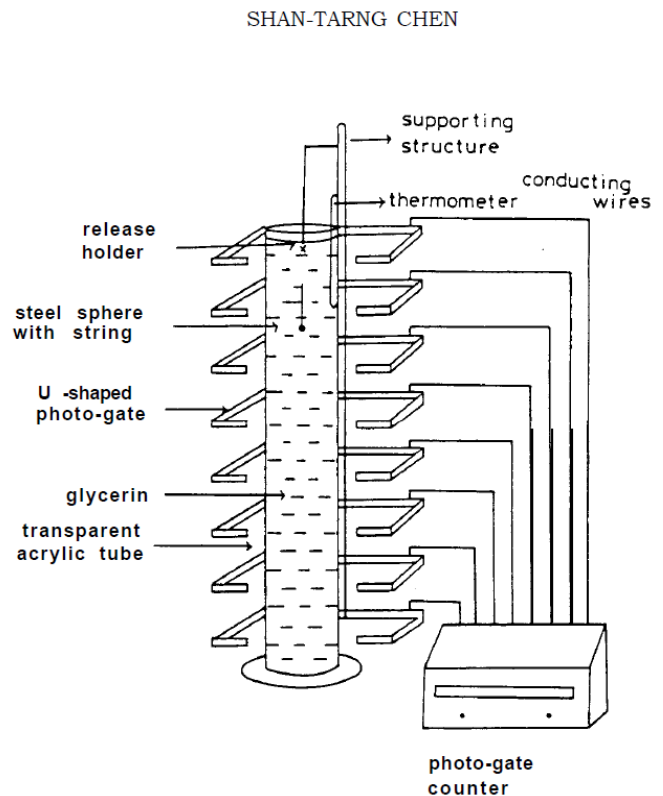


Figura 6. Fotocompuerta mide la posición de la esfera Vs tiempo

Con el título **Velocity measurement of a settling sphere** se halló un interesante dispositivo el cual también sugiere una forma creativa para realizar la experiencia. Este trabajo se presentó por N. Mordant and J.-F. Pinton de la Ecole Normale Supérieure de Lyon, Laboratoire de Physique, Lyon, France. en THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B de la Società Italiana di Fisica⁶.

El objetivo de este experimento es medir la velocidad de una esfera sólida que cae verticalmente por acción de la gravedad en el agua inicialmente en reposo (véase la figura 7). La bola es liberada sin velocidad inicial o rotación. La velocidad de la partícula se detecta mediante un nuevo método acústico. Se basa en la medición del Efecto Doppler de una onda de ultrasonidos dispersos

⁵ www.psroc.phys.ntu.edu.tw/cjp/download.php?d=1&pid=795

⁶ http://perso.ens-lyon.fr/jean-francois.pinton/ARTICLES/2000_EPJB_18_343.pdf

por el movimiento de la partícula. Si se registra la dispersión de ultrasonido en una dirección elegida, se observa un efecto Doppler en la pulsación de la onda. El experimento se lleva a cabo en un tanque de 1,1 m de longitud, 0,75 m de ancho y 0,65 m de profundidad, lleno con agua. Las Bolas usadas son de vidrio, acero y tungsteno.

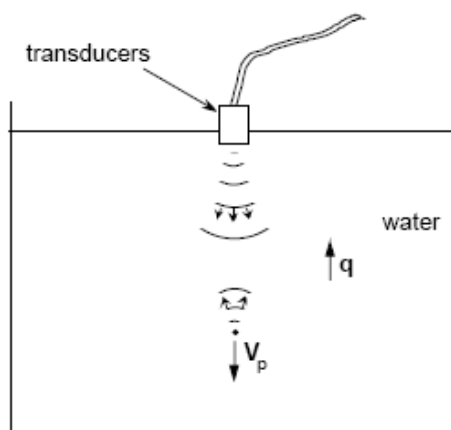


Figura 7. Configuración experimental y principio de la medida

Otro dispositivo que demuestra la Ley de Stokes es un tipo de viscosímetro con el principio de caída de bola para trabajo experimental en el aula y de uso comercial, es fabricado por la empresa española VENTUS Ciencia Experimental, S.L.⁷ con el que se puede realizar: Estudio del funcionamiento de un viscosímetro de caída de bolas. y la Medición de viscosidad de líquidos newtonianos en función de la temperatura. Este compuesto por

Viscosímetro de caída de bolas, Termómetro de 24 a 51°C, Juego de 6 bolas de diferentes densidades, Termostato de circulación, Cubeta de acero inoxidable para termostato, Cronómetro digital, Mangueras de pvc.

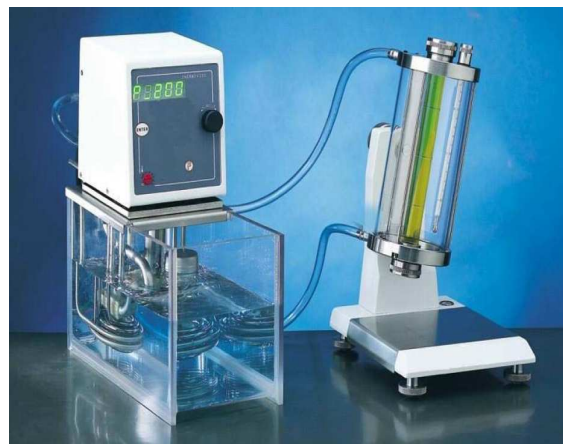


Figura 8. Viscosímetro Profesional de caída de bola

⁷ www.ventusciencia.com

El viscosímetro anterior se basa en el sistema de medida de H ppler. En este experimento se estudia la dependencia de la viscosidad de un líquido newtoniano en función de la temperatura. El procedimiento consiste en medir el tiempo que una esfera sólida necesita para recorrer una distancia entre dos puntos de referencia dentro del tubo inclinado que contiene la muestra bajo estudio. Mediante un termostato de circulación podemos variar la temperatura de la muestra y estudiar la variación de la viscosidad con la temperatura.

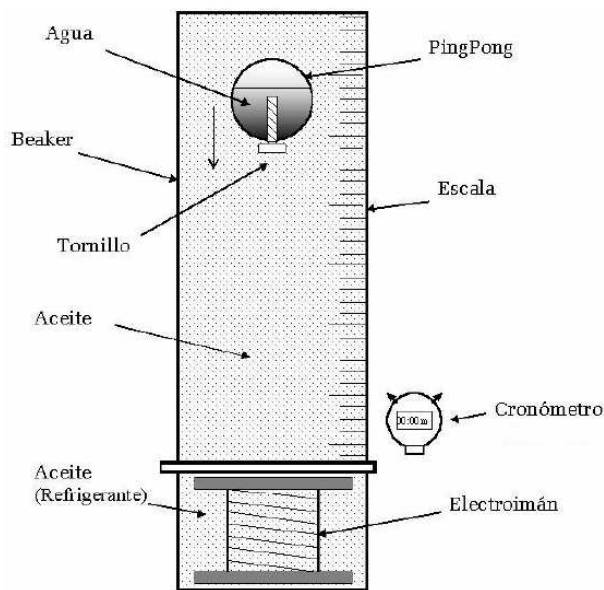


Figura 9. Montaje experimental para el estudio de la Ley de Stokes en función de la masa que cae dentro del fluido

En la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. Docentes del departamento de física realizaron una investigación interesante sobre el **ESTUDIO DE LA LEY DE STOKES**⁸. Estudiaron la dependencia de la velocidad terminal con respecto a la densidad de un cuerpo esférico que se mueve dentro de un recipiente con aceite. Para variar la densidad manteniendo el volumen constante se modifica la masa de una bola de ping-pong llenándola con diferentes cantidades de agua. Dependiendo de la relación de densidades el cuerpo cae o sube dentro del fluido, lo que permite obtener movimiento tanto ascendente como descendente. El inicio del movimiento ascendente del ping-

pong se controla por medio de un electroimán, que lo asegura momentáneamente en el fondo del recipiente. A partir de los datos de posición en función del tiempo se encuentra la relación entre la velocidad terminal y la densidad del cuerpo sumergido. Para velocidades superiores a 0.7 m/s es necesario corregir el término de la fuerza resistiva, que se toma usualmente lineal con la velocidad terminal. En la figura 9 se aprecia el diseño de este

⁸ REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA, VOL. 36, No. 1. 2004 **ESTUDIO DE LA LEY DE STOKES** R. Cárdenas, G. Chaparro*, y F. Fajardo (R. CARDENAS, 2004). *Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. 2003*

dispositivo, el cual nos muestra que la medición del tiempo se realiza de manera manual, usando el cronometro. Este experimento difiere del estudio usual de la ley de Stokes mediante la máquina de Atwood ya que el ping-pong no esta sujeto por ningún hilo⁹. Para determinar la velocidad terminal se midió la posición del ping-pong en función del tiempo, a intervalos de 10cm a medida que ascendía o descendía por el fluido.

A continuación se describe la practica con la maquina de Atwood, el diseño experimental para **Análisis de la velocidad de cuerpos esféricos en sustancias viscosas**, realizado por Débora Leibovich, María Cecilia Molas y Florencia Rodríguez Riou. *Facultad de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Favaloro*, de Buenos Aires, Argentina Dispositivo utilizado para la determinación de la velocidad en función del tiempo¹⁰.

La figura 10 muestra el dispositivo utilizado para realizar la experiencia. Este consta de una probeta conteniendo aproximadamente 500 ml de glicerina, dentro de la cual se coloca un cuerpo esférico de acero, atado a un hilo muy delgado y resistente. En el otro extremo del hilo se coloca un peso. Para realizar las mediciones se utiliza un foto interruptor ubicado de manera tal que el haz de luz se interrumpe al ser atravesado por cada rayo de la polea. De esta manera, es posible obtener la velocidad y aceleración de la esfera en función del tiempo.

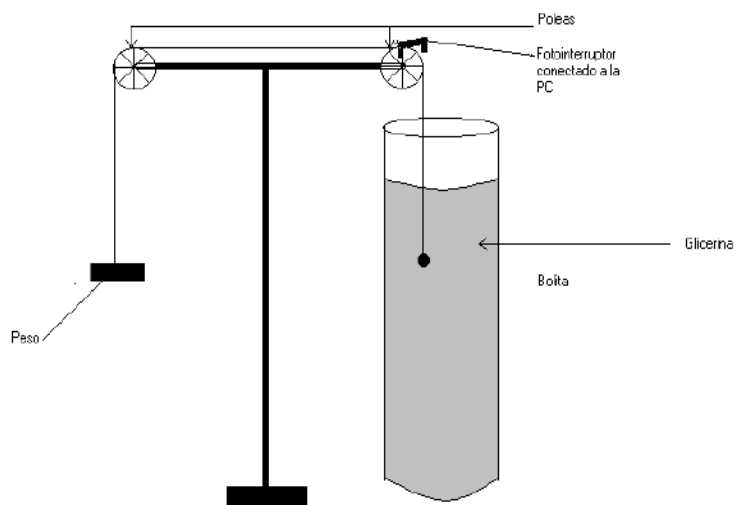


Figura 10. Dispositivo utilizado para determinar la velocidad en función del tiempo

⁹ http://www.sociedadcolombianadefisica.org.co/revista/Vol36_1/articulos/pdf/3601074.pdf

¹⁰ http://www.df.uba.ar/users/sgil/web_fisicarecreativa/informes/infor_termo/ley_stokes.pdf

El siguiente experimento¹¹ muestra otra manera de hallar la velocidad. Se usa un mecanismo de sistema de primer orden con la variable dinámica iniciando en la velocidad. Un detector de movimiento monitorea el carro, atado a una masa por un resorte el cual pasa sobre una polea. La masa es halada libremente por otra masa la cual esta libre en el movimiento vertical en un recipiente que contiene el fluido. Se puede iniciar con diferentes velocidades ya sea en la dirección positiva o la dirección negativa y observar el sistema cuando alcanza la velocidad terminal, los datos son procesados con el software the Mac Motion software del cual se selecciona velocidad.

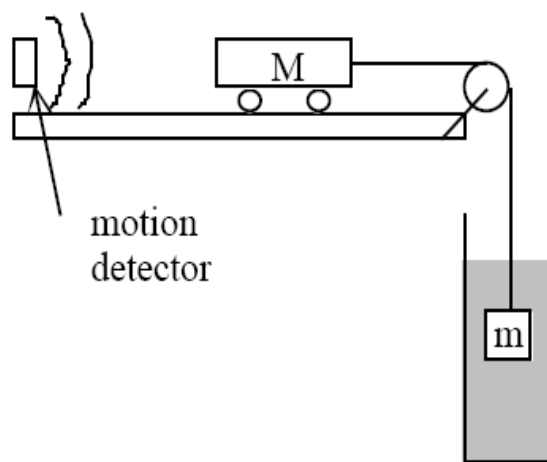


Figura 11. Mecanismo con detector de movimiento

Muy interesante es el trabajo de investigación¹² presentado por los docentes Watson L. Vargas, Lyda M. Pineda y Carlos A. Riaño de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada en Bogotá, Colombia: **Sedimentación de una esfera en un cilindro vertical con paredes de radio variable. Estos docentes** presentan los resultados de observaciones experimentales y computacionales de la sedimentación de una partícula en cilindros verticales cuyo radio cambia periódicamente a lo largo de la longitud, como se aprecia en la figura 12. Este estudio explora el efecto de los cambios abruptos de la geometría sobre la repuesta de una esfera bajo sedimentación. Dicho efecto debido a fuerzas hidrodinámicas de la pared, induce

¹¹ <http://www.calpoly.edu/~nsungar/terminal.pdf>

¹² www.umng.edu.co/www/resources/r15_10.pdf

aceleraciones y desaceleraciones de la partícula; Se presentan observaciones experimentales para cuando los cambios en el radio del cilindro tienen lugar abruptamente y cuando el cambio es gradual, finalmente se comparan dichos resultados con datos de un cilindro con radio uniforme. Es de anotar que en las geometrías que se consideran en este trabajo, la aceleración y desaceleración causada por las paredes se integran en el tiempo a través de la integral de memoria, de tal forma que la pregunta sería si esta fuerza afecta de manera significativa la velocidad de sedimentación de una partícula.

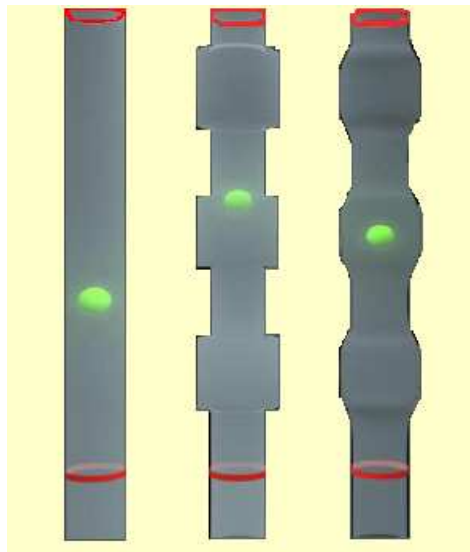


Figura 12. un cilindro vertical con paredes de radio variable,

La Universidad de San Martín en Chile presentó un proyecto de laboratorio virtual¹³ en el área de Mecánica Aerodinámica e Hidrodinámica titulada: Montaje de un viscosímetro de caída de bola para determinar la viscosidad de líquidos viscosos. Este desarrollo se muestra en la figura 13, su objetivo va encaminado a desarrollar la infraestructura necesaria para poder realizar experimentos físicos en forma remota, a través de Internet. El propósito de este experimento en particular es disponer de un sistema de medición que permita al usuario remoto determinar la viscosidad de un fluido.



Figura 13. Sistema para medir viscosidad de manera virtual.

¹³ www.experimentos.cl

2. ESPECIFICACIONES

Analizados y evaluados los documentos y modelos descritos en la sección 1, se inicia con el diseño y construcción del prototipo con el fin de alcanzar los objetivos propuestos.

Básicamente el prototipo esta conformado por los siguientes componentes: sensores, tubo cilíndrico de vidrio transparente con su respectiva cubierta, hardware de control y el software de interfaz gráfica para el usuario GUIDE.

2.1 ESPECIFICACIONES DE LOS SENSORES

Los sensores están compuestos por un panel de Leds IR y otro panel de Leds con fototransistores (FTR).

El panel emisor genera la radiación infrarroja recibida por los fototransistores FTR cuyo propósito es generar los cambios de corriente que serán detectados por el circuito electrónico diseñado para este fin. Ambos circuitos dependen de la fuente de alimentación a 12V y 5V DC.

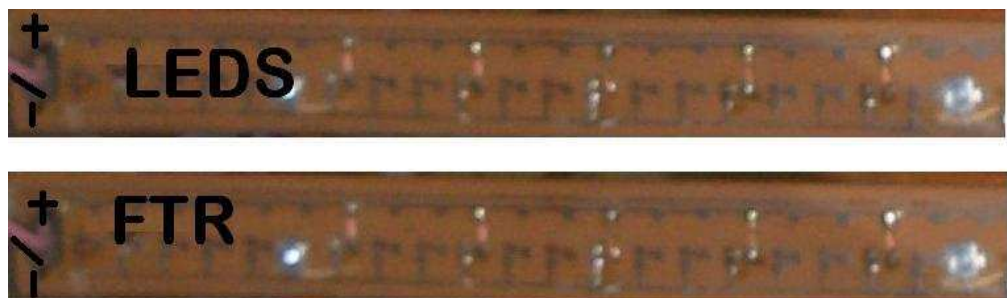


Figura 14. Plaqueta de sensores

2.2 ESPECIFICACIONES DEL HARDWARE

Para recibir la señal de los FTR IR, tomarla y procesarla parcialmente se diseño y construyo un circuito electrónico capaz de detectar pequeñas variaciones de corriente y luego amplificarlas para ser llevadas al microcontrolador y de este ser transmitidas al computador utilizando el puerto serial RS232. Para este proceso se hace uso de una interfaz de visualización como es la pantalla LCD de 2X16 líneas.

Para visualizar gráficamente la señal, el circuito debe estar siempre conectado al puerto serial de una PC.

El voltaje para la fuente es de 110V ADC, regulada para proteger el circuito. El valor mínimo del tiempo de muestreo es de 1ms, el número de muestras a tomar es 4000 muestras de acuerdo al tiempo programado. La velocidad TX USART (Bps) es 19200.

Se utilizó el microcontrolador 18F452 de la familia Microchip, con una frecuencia de cristal de 20 MHz, para coordinar todos los procesos del sistema, imprimiendo los menús de opciones del prototipo en la pantalla LCD, controlando la captura de las señales, almacenándolas en la memoria RAM del circuito principal y manejo del motor paso a paso. Para almacenar los datos se usó una memoria estática SRAM 32Kb y para manejo del motor se empleó el CI SLA 7024M y los expansores PCF 8574, necesitó ampliar las líneas para conectar dispositivos.

2.3 ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS DEL SOFTWARE



El software fue implementado en el Matlab® 7.0, por tanto los requerimientos del sistema para trabajar apropiadamente son los mismos que para este lenguaje, como por ejemplo memoria RAM de 512 Mb, procesador Pentium IV, capacidad de DD 80GB, Sistema Operativo Windows XP SP2, Puerto Serial RS232, y unidades de almacenamiento externas para transportar los datos o conexión a internet.

Para operar el prototipo se requiere que este instalado en el computador que va a ser utilizado para la recepción de la señal el MatLab 7.0. El software para recibir la señal se realizó en este programa como un archivo con la extensión **.m** y se denominó **velocidad_terminal.m**.

El software del microcontrolador fue desarrollado en Mplab, la simulación del circuito se realizó en Proteus, y los filtros se diseñaron en Filterlab 2.0.exe y la respuesta en frecuencia se obtuvo en FilterFree 2008.exe.

3. DISEÑO ELECTRÓNICO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE

El sistema desarrollado esta esquematizado en el siguiente diagrama de bloques

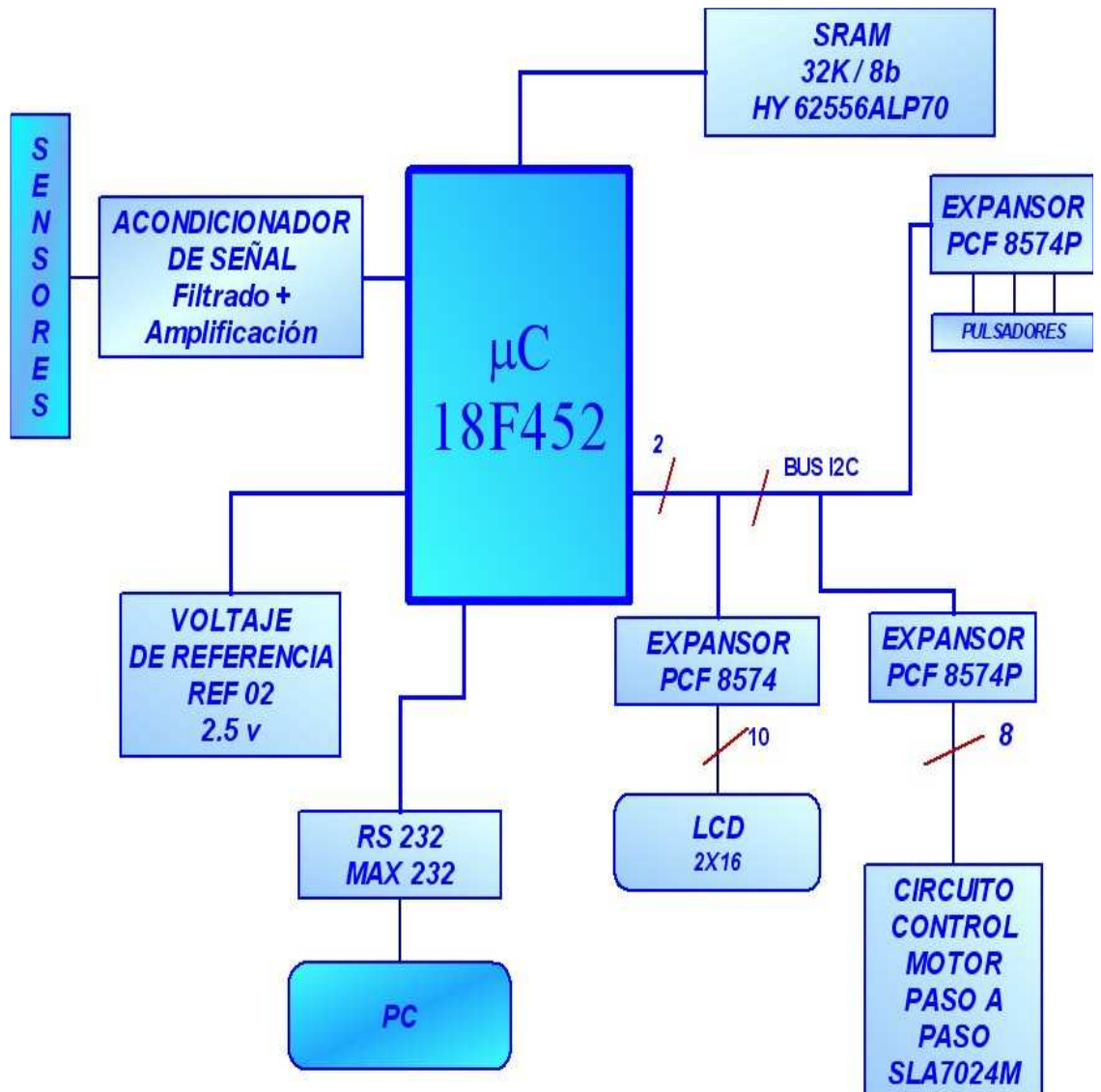


Figura 15. Diagrama de bloques del Hardware

3.1 DESCRIPCION DEL HARDWARE DEL CIRCUITO

El proyecto tuvo como propósito principal diseñar un sistema didáctico para mostrar a los alumnos el comportamiento de una partícula esférica en un medio viscoso y la manera como se puede estudiar mediante la adquisición de una señal. La experiencia de laboratorio diseñada permite deducir que el fenómeno observado se puede medir usando las tecnologías apropiadas y que mediante procedimientos matemáticos adecuados es posible realizar cálculos para analizar los fenómenos físicos.

Una vez caracterizado el sensor a utilizar entre las muchas opciones ensayadas como: LDR o fotorresistencias, sonar, Leds emisores de luz, fotodiodos, bobinas, entre otros dispositivos; se decidió por un **sensor fotoeléctrico** de infrarrojos, como el **FOTOTRANSISTOR**, uno de los optocomponentes más importantes. Este sensor se basa en la acción del fotodiodo combinada con la función del transistor (que es un amplificador de corriente), por lo cual se obtiene un componente muy sensible a la luz. Funciona como el receptor de rayos infrarrojos que emitirán los Leds Emisores IR.

La **elección de los sensores** constituyó una de las **etapas más importantes y críticas** ya que el sensado de la variable física se realiza a partir de ellos. Se trató entonces de buscar un dispositivo económico, que presentara la mejor respuesta a un ambiente natural. Teniendo en cuenta que la luz ambiente no tuviera mucha influencia, ni la práctica requiriera de condiciones especiales como oscuridad u otra característica especial.

El material que se utilizó no es el que se usaría a nivel profesional, pero dentro de sus limitaciones funciona aceptablemente en un ambiente experimental como el de este proyecto. Una dificultad encontrada en el mercado común es que los FTR ni Leds se consiguen con las mismas características. Es decir no se garantiza que la respuesta sea la misma por parte de todos los FTR. Además no se tiene un valor exacto de su λ , ya que el vendedor no lo suministra, solo se sabe por la referencia de otros productos similares.



Figura 16. Fototransistor

El fototransistor físicamente se parece mucho a un fotodiodo y básicamente tiene el mismo principio de

funcionamiento, es un dispositivo que conduce una cantidad de corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que lo incide (lo ilumina).

Los fototransistores son los componentes más ampliamente usados como receptores de luz, debido a que ofrecen la mejor relación entre la sensibilidad a la luz y la velocidad de respuesta, comparado con los componentes fotorresistivos, además responden bien ante luz visible e infrarroja.

El funcionamiento de un fototransistor se caracteriza de la siguiente manera. Un fototransistor opera, generalmente sin terminal de base ($I_b=0$) aunque en algunos casos hay fototransistores que tienen disponible un terminal de base para trabajar como un transistor normal.

Las curvas¹⁴ de funcionamiento de un fototransistor son las que aparecen en la Figura 17. Como se puede apreciar, son curvas análogas a las del transistor BJT, sustituyendo la intensidad de base por la potencia luminosa por unidad de área que incide en el fototransistor. El Anexo G. muestra la hoja de datos del fototransistor

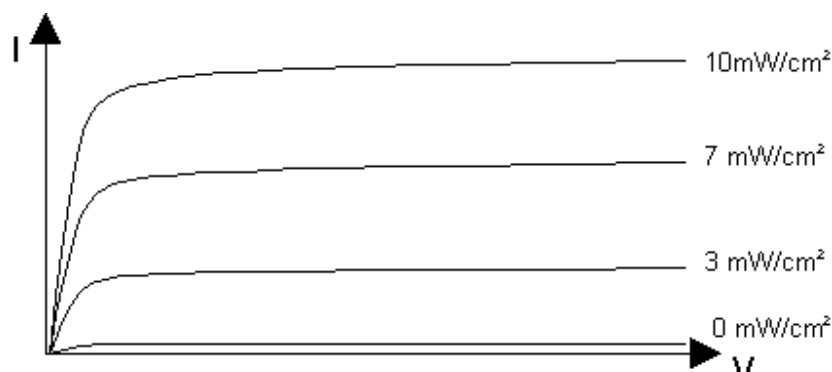


Figura 17. Curvas características de un fototransistor típico

UnLED es un semiconductor eléctricamente similar a un diodo que emite luz cuando una corriente circula por él en forma directa. El tipo de Led usado fue un INFRARROJO reciben la denominación de **diodos IRED** (*Infra-Red Emitting Diode*).



Figura 18. Led Emisor IR

¹⁴ <http://www.info-ab.uclm.es/labelec/solar/Componentes/OPTOELECTRONICA.html#3544>

El LED¹⁵ infrarrojo irradia la señal hasta el receptor en forma de luz invisible al ojo humano. Tienen geometrías especiales para evitar que la radiación emitida sea reabsorbida por el material circundante del propio diodo, lo que sucede en los convencionales. Se utilizan ampliamente en aplicaciones visuales, como indicadores de cierta situación específica de funcionamiento.

En el proyecto la función del diodo LED de infrarrojos es emitir la señal para ser captada por el Fototransistor que será el receptor, obsérvese la figura 19. Cuando un objeto se sitúa enfrente del conjunto emisor/receptor la luz emitida ya no es captada por el receptor lo que causara cambios en la salida de la corriente que serán detectados por el circuito que pasará a un nivel bajo de la señal, lo que indicara que el objeto esta cruzando y, por consiguiente, se inicia la toma de muestras.

Seleccionados los anteriores dispositivos, se procedió a construir el panel de Leds emisores IR y receptores FTR para sensar el paso de la partícula a través de estos. Se ideó el dispositivo de tal manera que su ubicación en el tubo fuera alineada, para así obtener el mismo potencial y además evitar que el mal funcionamiento de uno interfiriera en la señal del otro. Por esta razón se decidió realizar una conexión en paralelo, como se aprecia en la figura 19, otra de las razones es que no hay dificultad si se desea aumentar el numero de Leds.



Figura 20. Prototipo visto lateralmente

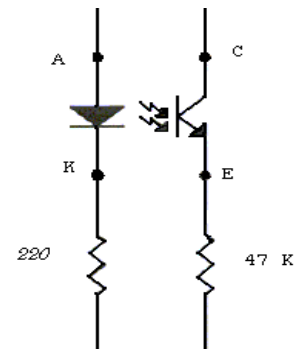


Figura 19. Led IR y FTR

A continuación se muestra el prototipo con la ubicación de los sensores lateralmente alineados para que haya una excelente Emisión/Recepción de la señal, como se aprecia en la figura 20.

Se decidió proteger los sensores de incidencia de luz externa usando una cubierta en acrílico negro y a la vez proteger el tubo de vidrio contra golpes o posibles fisuras, como se visualiza en la figura 21. El cual representa el producto final.

¹⁵ http://enciclopedia.us.es/index.php/Diodo_LED



Figura 21. Prototipo Ensamblado

Inicialmente se emplearon 11 sensores, y para obtener la señal requerida se realizaron varias pruebas a los mismos, hasta que se logro obtener la señal requerida, para luego ser amplificada en la etapa siguiente y facilitar su medición. Más adelante se tomó la decisión de aumentar el número de sensores a 15 con el fin de hacer un mejor seguimiento al recorrido de la esfera y obtener datos confiables de dichas observaciones, para realizar un mejor análisis al fenómeno estudiado y extraer las conclusiones pertinentes.

Después de analizar los sensores y demostrar que la señal era posible obtenerla a partir de los LED FTR se procedió a diseñar, construir y probar el circuito de acondicionamiento, filtrado y amplificación de señal, así como la etapa de adquisición, las cuales se describen a continuación.

El dispositivo a diseñar fue el **Acondicionador de señal** el cual consta del **filtrado** y **Amplificación** de la señal, como se aprecia en la figura siguiente.

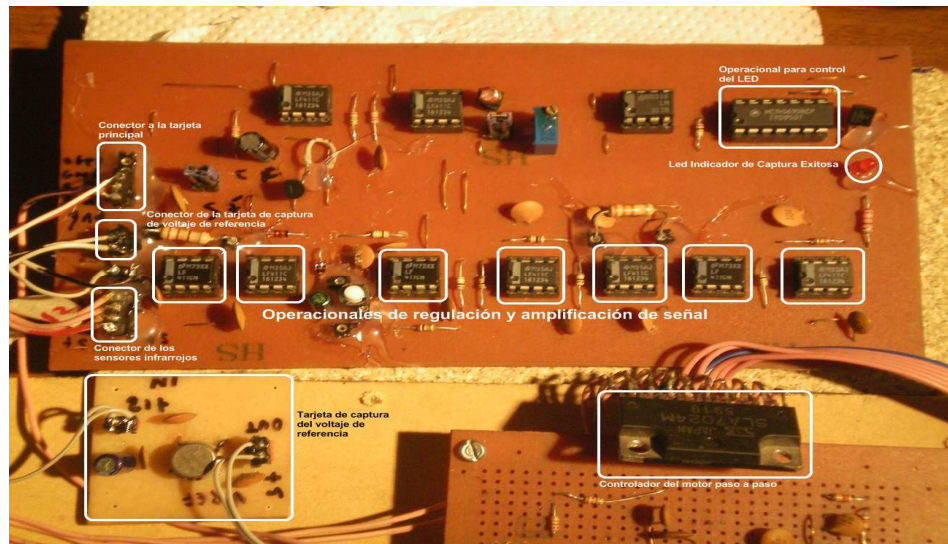


Figura 22. Tarjeta de Acondicionamiento de Señal

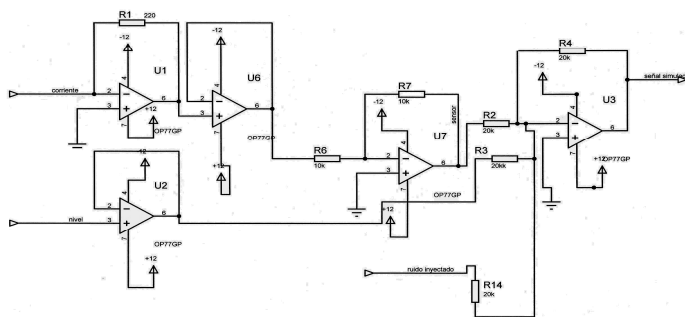
Obsérvese que se tiene un detector de pico el cual informa sobre las fluctuaciones hechas en el voltaje al variar la corriente que recibe cada FTR cuando pasa la esfera. Este voltaje baja, de aquí se pasa a un restador con el fin de suprimir el offset y solo obtener la variación producida por cada fototransistor, es decir el voltaje pico. En este punto sólo se tiene la fluctuación, que es la que interesa medir, ella se lleva a un amplificador por 4 ya que la señal es por el orden de los 200 a 250 mV. La señal es recibida por un buffer a ganancia uno con el fin de invertirla y de aquí se lleva a un filtro Butter Worth de orden dos, cuyo propósito es suprimir distorsiones presentadas en la señal y conservar solo la que se va a trabajar. El filtro es el encargado de atenuar las frecuencias altas lo cual es útil para eliminar componentes de alta frecuencia indeseables de una señal y conservar al máximo las deseadas ya que estas son las encargadas de producir interferencias en la señal, provocando mediciones erróneas. Por ultimo, se adiciona el comparador LM311 y se obtiene la señal digitalizada para transmitirla a la siguiente etapa. Con el fin de tener un voltaje de referencia de precisión se adicionó el circuito para este fin con el integrado PCF42.

Antes de llevar el circuito al protoboard en el programa Proteus se diseñó este circuito y el circuito para simular la señal de los sensores, el cual funcionó correctamente en el PC. Pero cuando se hicieron las pruebas reales con las esferas empezaron las dificultades (ver sección de dificultades). Se inicio,

entonces, el tratamiento de la señal con el fin de lograr mejores resultados, lo cual posibilitó mejorar el filtro y otros componentes electrónicos. El tratamiento de la señal finalmente permitió adquirir una señal con menos interferencia, como se puede ver en las graficas que presentan los resultados (ver sección de resultados).

A continuación las gráficas permiten apreciar los circuitos simulados y construidos para esta etapa.

CIRCUITO DE SIMULACIÓN DE SEÑAL DE LOS SENSORES



Gráfica 23. Circuito que simula la Señal de los Sensores

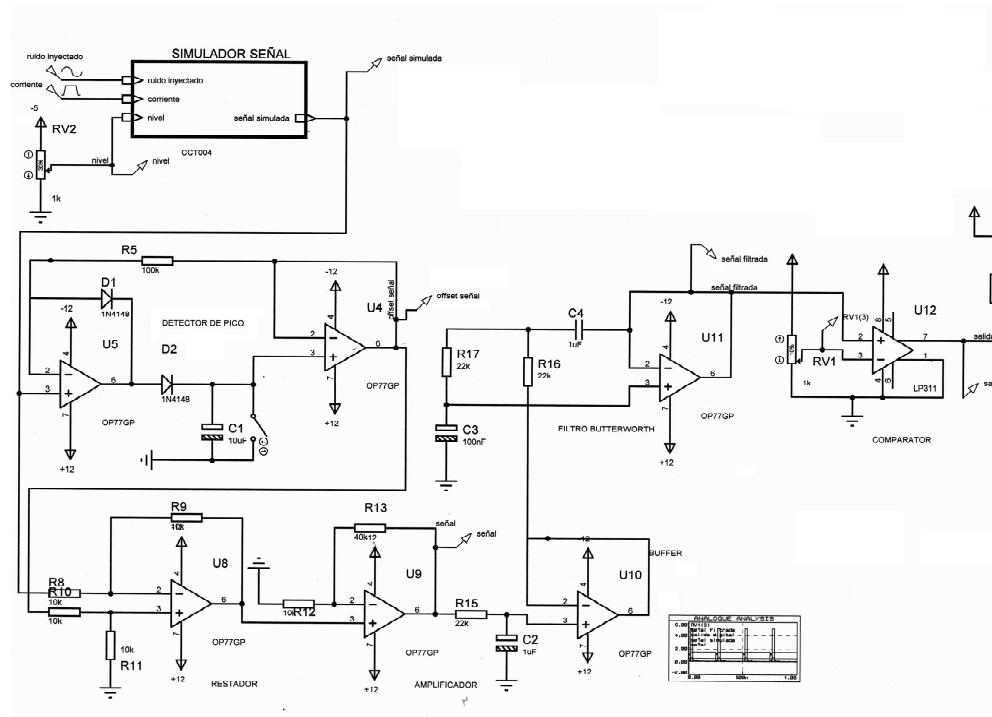


Figura 24. Circuito Amplificador de Señal

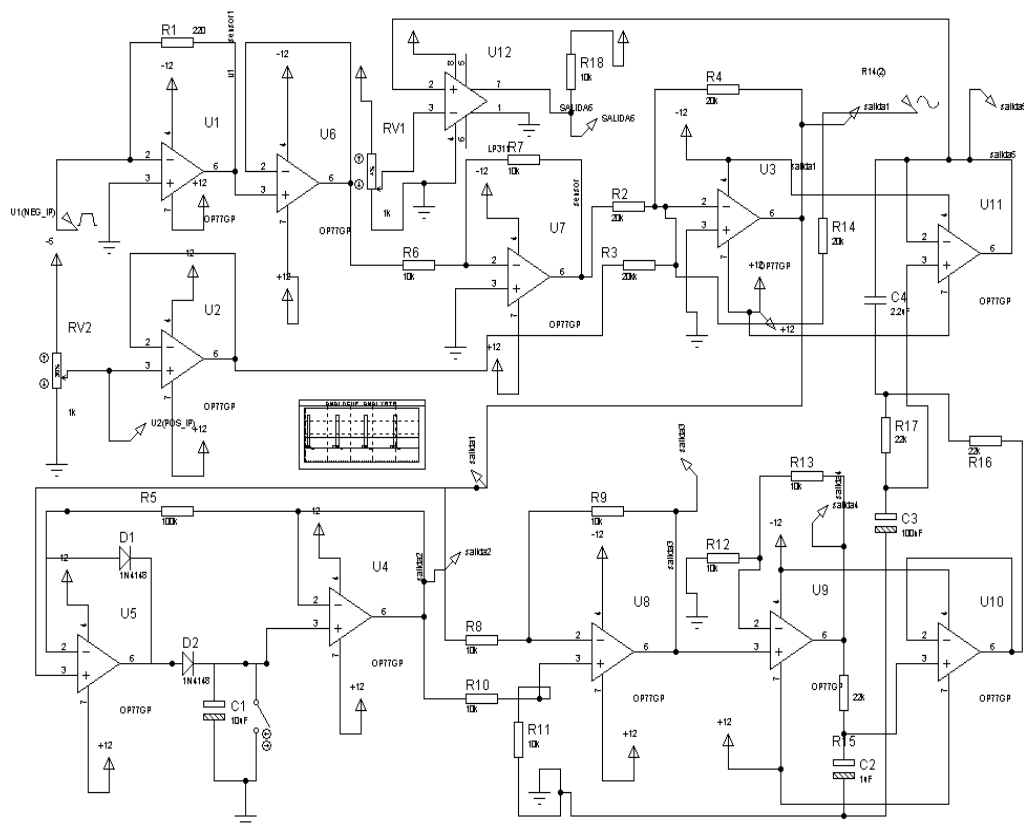


Figura 25. Circuito Acondicionador de Señal

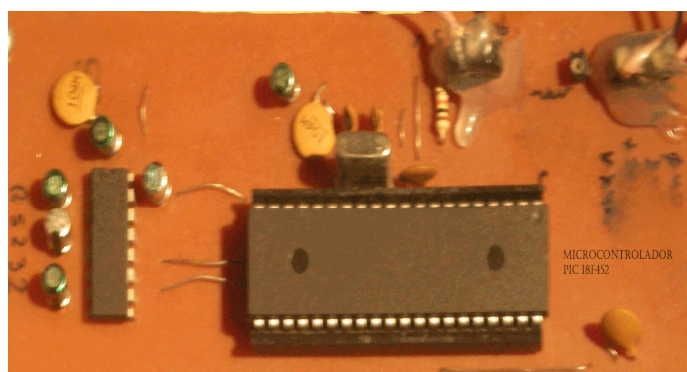


Figura 26. Microcontrolador Pic 18F452

Continuando con la descripción del diseño se ha elegido para procesar la señal un microcontrolador **PIC18F452** de la familia Pic de Microchip por sus particularidades de funcionamiento (ver anexo C. Hoja de datos del Microcontrolador). Este dispositivo permite tener cinco canales de conversores analógico/digital para el recibir las señales de los sensores, una **USART** para la comunicación

con un PC a través del conector RS232, que permite graficar los datos y adicionalmente un puerto I2C. Se puede así establecer una interface con una memoria externa, la cual almacena los datos temporalmente mientras son transmitidos al PC.



Figura 27. Memoria SRAM

Como la memoria del micro es insuficiente para almacenar los datos del muestreo, por esto se hizo necesario expandir su memoria usando una RAM estática **SRAM** de 32 Kb, que tiene una capacidad de 62256 bytes, cuya referencia es HY62256MP-70. Esta permite almacenar un gran número de muestras de acuerdo a su capacidad, posibilitando así al usuario un amplio margen en el muestreo.

El bus I2C se ha convertido en un estándar dentro de los buses serie y muchos fabricantes de semiconductores lo incluyen en sus dispositivos. Se puede encontrar en circuitos integrados tan variados como: expansores de líneas de I/O, convertidores A/D y D/A, EEPROM, Relojes en tiempo real, μ C, sensores de temperatura, entre otros. Por consiguiente tienen diversas aplicaciones con dispositivos operativos que utilizan un bus paralelo a un bus serie I2C para comunicarlos con otros utilizando únicamente dos líneas.

En el proyecto para ampliar las funciones del microcontrolador, se usaron varios **PCF8574** CI expansores I/O, con el fin de expandir el bus I2C para obtener la comunicación con la pantalla LCD a 10 líneas, con el circuito control del motor paso a paso que usa el SLA7024M para 8 líneas y el panel compuesto por los pulsadores a 4 líneas.

El PCF8574 proporciona una salida de interrupción que puede conectarse a una entrada de interrupción externa del μ C. Cuando el expansor detecta un cambio en cualquiera de las líneas de entrada, se genera una señal de interrupción por la línea INT para que el μ C pueda leer el nuevo dato por el bus I2C. La señal únicamente puede ser generada cuando el puerto está configurado como entrada. Cuando el μ C recibe la señal de interrupción activa la correspondiente subrutina de servicio, la cual captura el dato y lo envía vía serie ya sea para su representación en la pantalla LCD o para activar un dispositivo como el motor.

El circuito impreso de la figura 28 enseña como es el diseño físico de esta tarjeta con sus componentes.

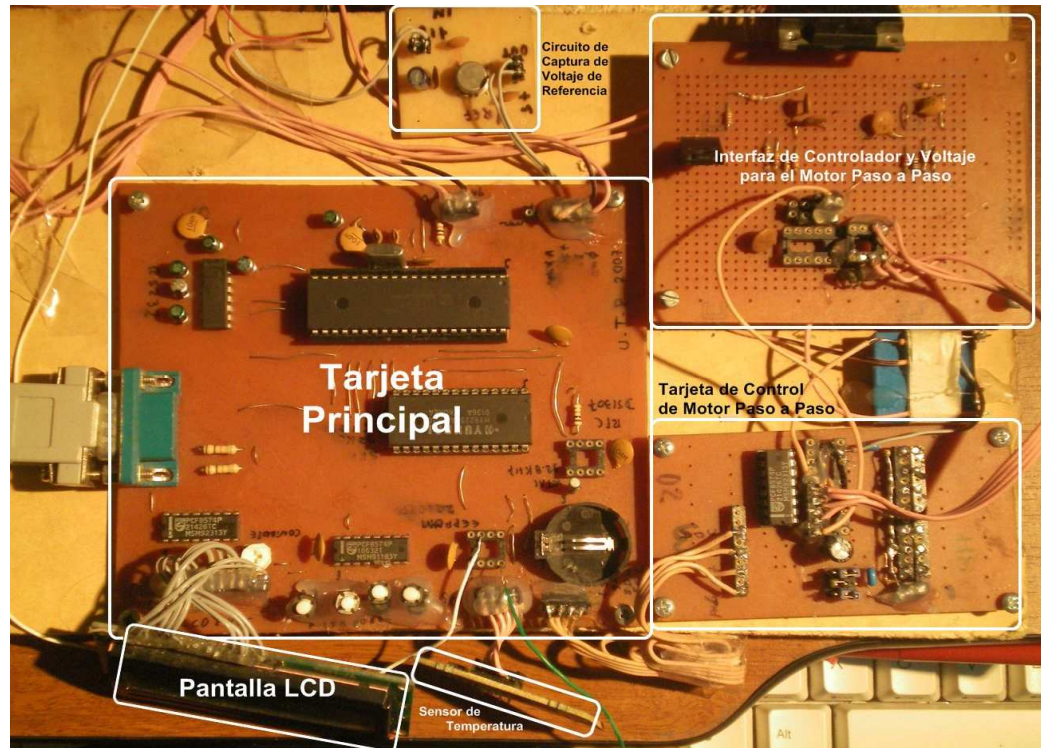


Figura 28. Sistema de adquisición de datos y tarjeta para controlar Motor



Figura 29. Pantalla LCD 2X16

La LCD usada para visualización del menú para control del hardware es de 2 líneas x 16 caracteres. Lleva incorporado un controlador estándar Hitachi HD44780. El programa Principal para su manejo fue realizado en MPLAB. El menú principal solicita un carácter desde cada pulsador el cual es enviado a través del PCF8574 al μC a través del I2C, y este a su vez lo reenvía para ser visualizado en el módulo de la LCD.

Para la comunicación el sistema puede transmitir la información a través de la USART usando el sistema estándar RS232, de esta forma puede comunicarse directamente con un PC a través del puerto serial. La transmisión USART se habilita directamente por el usuario para que el sistema se comunique inmediatamente con el PC. A continuación se muestra la fotografía para tener una imagen más clara de cómo se diseñó el hardware del prototipo.

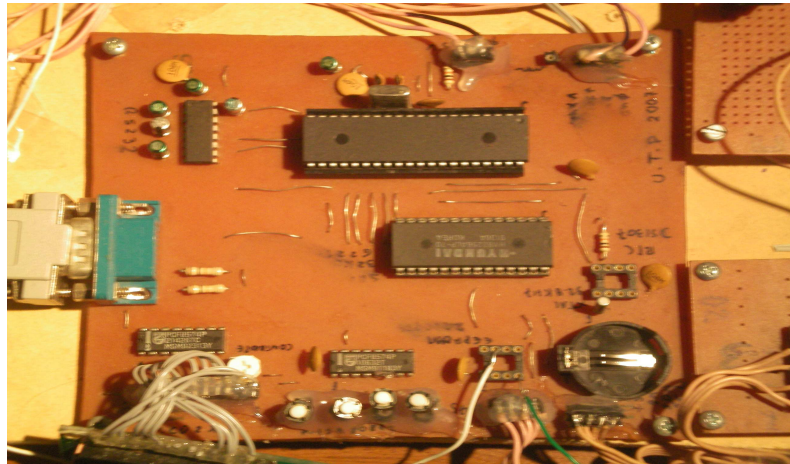


Figura 30. Sistema de adquisición de datos e interface serial

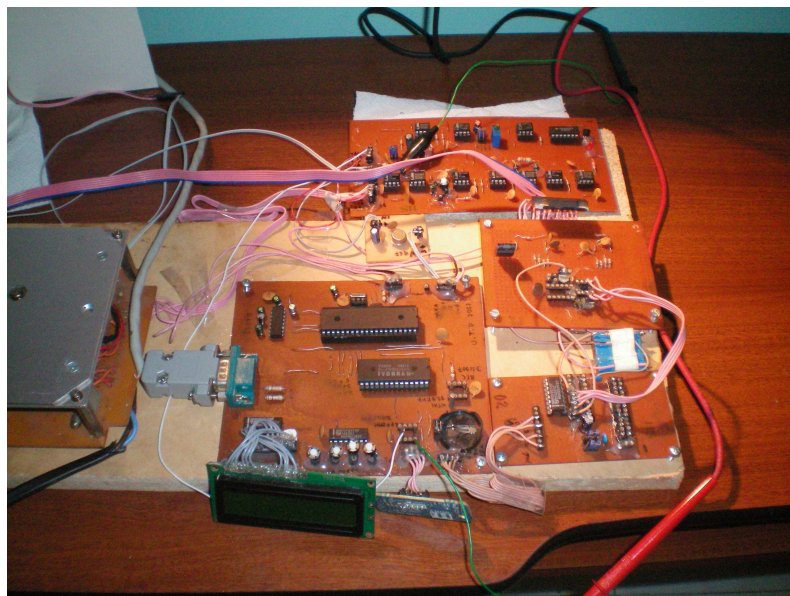


Figura 31. Hardware del prototipo

3.2 DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO

3.2.1 Sensores. Para detectar el paso de la esfera a través del fluido se utilizaron diodos emisores de luz infrarroja IR cuya longitud de onda se acopla con la longitud de onda captada por los fototransistores infrarrojos, originando una respuesta a la longitud de onda del diodo emisor. Tanto los diodos emisores como receptores fueron conectados en paralelo, como se ve en la figura siguiente.

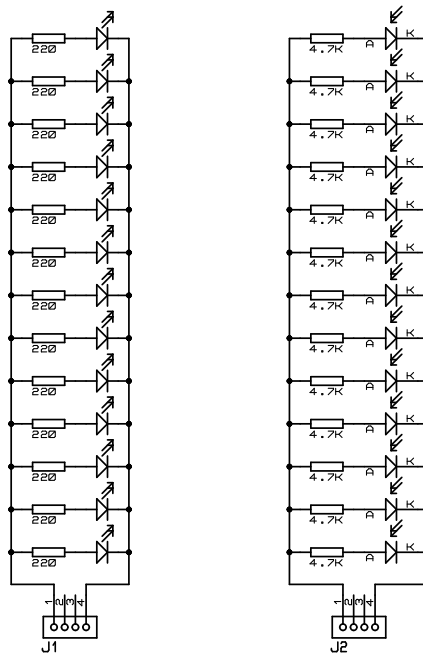


Figura 32. Conexión Sensores

Cuando el sistema se encuentra en reposo (no hay paso de esfera) cada **fototransistor** produce una corriente llamada corriente en reposo, esta corriente técnicamente es igual en cada diodo.

Dicha corriente nos da un punto de suma que equivale a ΣnI , es decir equivalente al número de transistores por la corriente que produce cada uno de estos fototransistores. Ella va a un amplificador o convertidor de corriente a voltaje, el cual entrega un voltaje negativo $V = -IR$. Este voltaje corresponde al **voltaje del circuito en reposo**.

Cuando la esfera cruza por el fototransistor hay una fluctuación en la corriente total, es decir, hay una disminución de esta corriente debido a que la luz que incide sobre el fototransistor baja. Automáticamente se produce una variación en el voltaje, las fluctuaciones que se producen técnicamente deberían ser iguales, suponiendo que la esfera pasa por el frente y que todos los fototransistores responden de igual manera. Las fluctuaciones producidas son del orden de 50mV dependiendo de cómo la esfera cruce por el sistema de sensores y afecte el nivel de reposo (offset).

La fluctuación del voltaje a partir del nivel DC trae la información del paso de la esfera y esta variación es la que debe ser amplificada para realizar una medición confiable del tiempo que demora el paso de la esfera por cada sensor. La señal es lenta, del orden de los 2Hz, se puede decir, entonces, que el sistema de acondicionamiento de señal debe amplificar la fluctuación y eliminar el nivel DC, filtrar el ruido para luego establecer una comparación.

La siguiente figura da una idea de lo que sucede con la señal y como se transforma con el circuito de acondicionamiento.

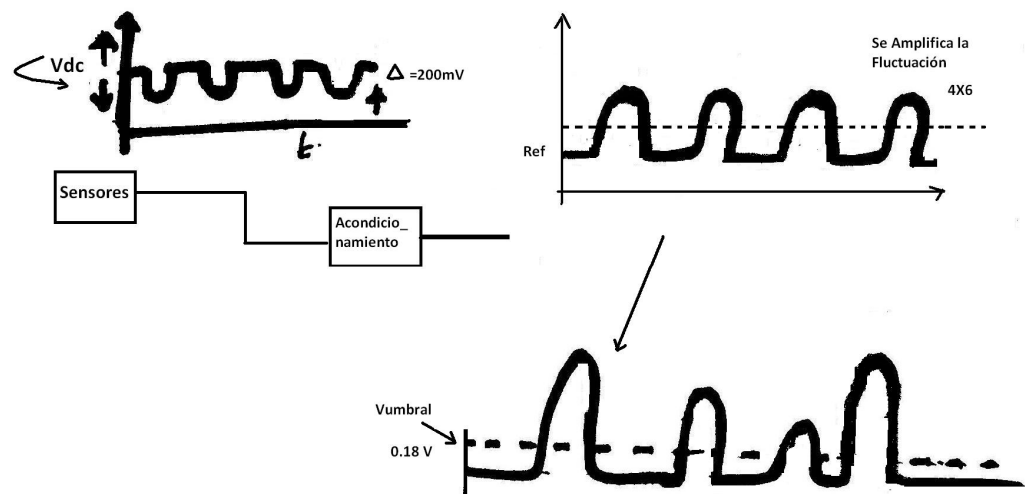


Figura 33. Fluctuación de la señal

3.2.2 Descripción del sistema de Acondicionamiento de señal.

Este consta de:

1. **Un buffer** que es un acople de impedancia realizado con un amplificador de ganancia uno y un inversor. En esta etapa la señal queda invertida.
2. **Detector de pico positivo.** Mide o guarda el nivel de reposo de la señal. Dicho detector de pico estará en el pico más alto de la señal, por lo que se debe resetear el sistema para ubicarlo en el nivel actual (reposo).
3. **Restador.** Si al nivel de reposo se le resta la señal que esta a un voltaje negativo, este entrega la fluctuación producida por el sistema, lo que da una variación aproximada de 50mV. Teóricamente si no hay fluctuación la nueva señal debe entregar un valor de cero. La fluctuación obtenida va a un amplificador no inversor de ganancia cuatro. Luego pasa a un filtro Butterworth con una frecuencia de corte de 40 Hz el que elimina las señales de 60 Hz producidas por el ruido ya sea eléctrico o de otro tipo que afecte al sistema. Esta señal va al sistema de adquisición de datos ya filtrada.

3.2.3 Sistema de adquisición de datos. Este sistema consta de un microcontrolador de la familia de Microchip el PIC 18F452 y una memoria externa la cual permite almacenar los datos correspondientes a la señal que se registra con el paso de la esfera, y que ha sido tratada antes de ser recibida por el microcontrolador, para luego ser enviada por el puerto serial al computador. Luego es procesada por la interfaz gráfica (GUIDE) en Matlab.

El programa del microcontrolador se maneja a través de una pantalla LCD, la cual visualiza inicialmente varias opciones de menú que se operan a través de pulsadores y permite seleccionar los diversos parámetros como: adquisición de señal, número de muestras, tiempo de muestreo, manejo de motor y transmisión de los datos por el puerto serial.

El circuito que se muestra en la página siguiente corresponde a la simulación de todo el diseño del prototipo, incluye todos los componentes utilizados para la realización del proyecto.

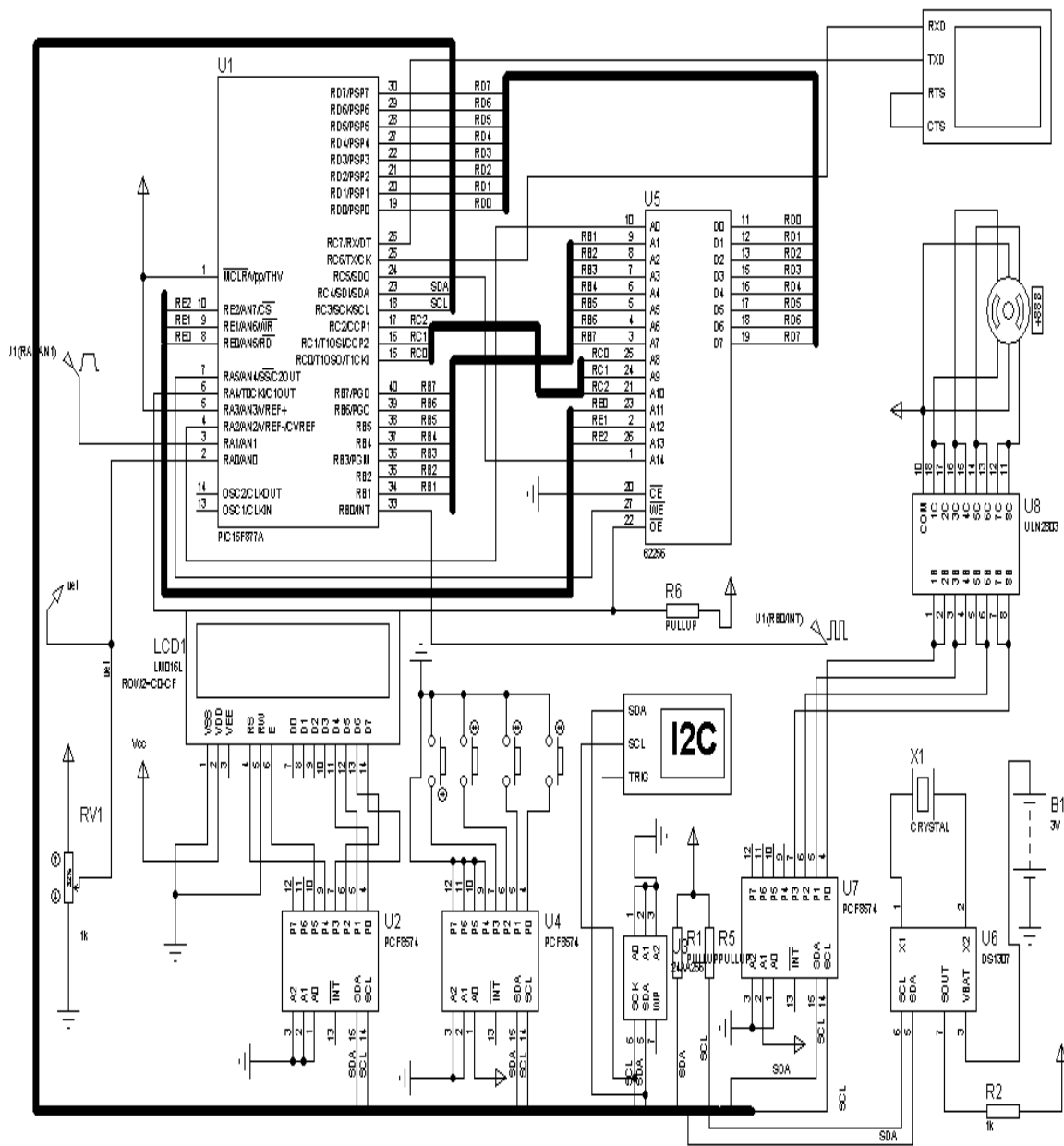


Figura 34. Circuito De Velocidad Limite en Fluidos

4. DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SOFTWARE

4.1 MODO DE OPERACIÓN DEL HARDWARE

Con el fin de cumplir con los requerimientos del proyecto el microcontrolador se programó en el MpLab @ IDE de Microchip, dicho código se puede ver en el Anexo D, Código fuente del Microcontrolador.

El software se diseño con base en el diagrama de estados que se aprecia a continuación.

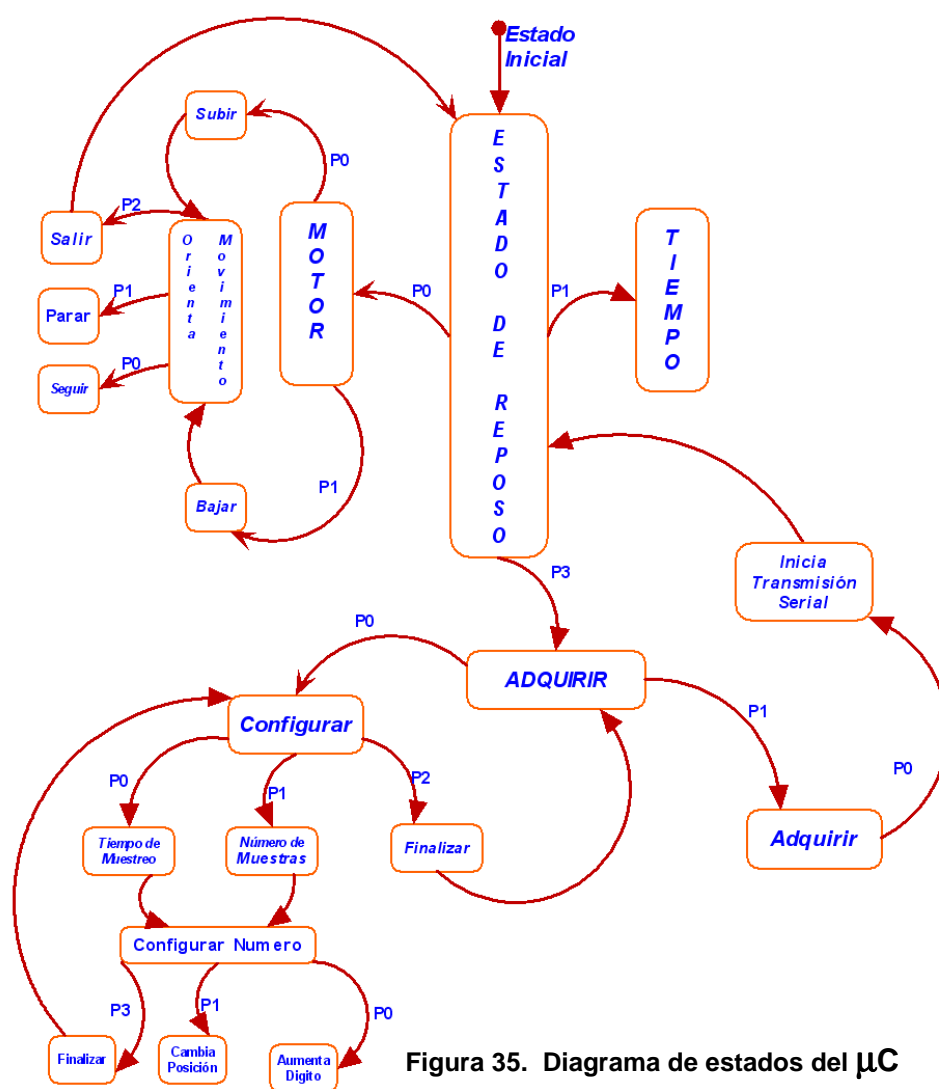


Figura 35. Diagrama de estados del µC

El software consta de varios estados de operación como se ve en el diagrama anterior, cada uno de ellos puede funcionar de manera independiente y es llamado con una instrucción individual.

La mayoría de las funciones de cada uno de los mismos es sencilla y su manejo muy intuitivo. Los tres primeros menús conducen a adquisición de señal, configuración de motor y medida de tiempos.

Todos los menús cuentan con dos o más menús en los que se pueden encontrar funciones comunes. Estas funciones utilizan el mismo nombre pero las diferencias radican en el modo de operación.

Estado De Reposo. Corresponde al estado inicial del sistema, aún no se ha colocado a operar. Regresa a dicho estado siempre que finaliza alguna configuración o ha termina la transmisión vía serial al PC. Se puede decir que el sistema es estático en este modo.

Estado de Adquisición. El sistema entra en el ciclo de sensado de la señal. Aquí se inicia la toma de muestras del movimiento de la esfera. Cuando se presiona P1 se llega al estado inmediato de adquisición, y cuando esta termina se retorna al software del PC y se elige capturar, para que presionando P0 se inicie la transmisión serial y el hardware retorne a su estado inicial cuando esta transmisión termine.

La otra alternativa es presionar P0 para obtener un submenú de configuración que permite llegar a la parte donde se configura el tiempo de muestreo y el número de muestras al presionar P0, P1, P2.

El menú que configura el número de muestras (Nm) a adquirir, por defecto se halla establecido en 4000, y el tiempo de muestreo que se halla también por defecto en 1ms. Así se puede controlar la velocidad de adquisición de la señal. Por ejemplo para 1ms el tiempo total de muestreo será de 4s, para una configuración de 5ms el tiempo total de muestreo de la adquisición estará en 20ms.

El diagrama muestra que para cambiar de estado se hace con los botones P0, P1, P2, P3. Cada uno de estos lleva a un nuevo estado.

Con P1 se configura el numero de muestras y el tiempo de adquisición se realiza presionando P0. Con este mismo se va aumentando el digito hasta llegar a 9, si se continua presionando retorna a cero nuevamente, por lo que se debe presionar P1 con el fin de cambiar la posición del digito pasando a la posición de las decimas, y de nuevo se continua presionando P0 para ir

aumentando el dígito, y así hasta llegar a la cantidad deseada. Con P2 se finaliza este menú y se retorna al estado de reposo.

Estado Motor. En este estado se controla el movimiento del motor para subir o bajar la canasta que recibe las esferas. Con P0 sube y con P1 baja, y nuevamente con P1 se detiene el movimiento ya sea de subida o de bajada, con P0 se activa de nuevo la movilidad y con P2 finaliza este menú.

Estado Tiempo. Este permite tener una medida digital de los tiempos.


En la siguiente figura se aprecia el menú inicial para manejo del hardware



Figura 36. Menú Inicial para manejo del hardware

A continuación se describe el software para la interfaz gráfica con el usuario que permite observar la señal adquirida en el PC y medir el tiempo de muestreo.

4.2 MODO DE OPERACIÓN DEL SOFTWARE

Con el fin de transmitir los parámetros necesarios y recibir y procesar la información que el dispositivo envía al PC, se desarrolló un software en Matlab 7.0,  el cual permite el control y manejo del hardware a través de su interface **GUIDE**.

Se eligió este software por la facilidad de programación de su interfaz gráfica, también porque permitió procesar la señal como lo requería el sistema diseñado y además por su transportabilidad y facilidad de manejo por parte del usuario. La siguiente figura enseña el menú de entrada del programa que fue diseñado para interacción con el usuario.

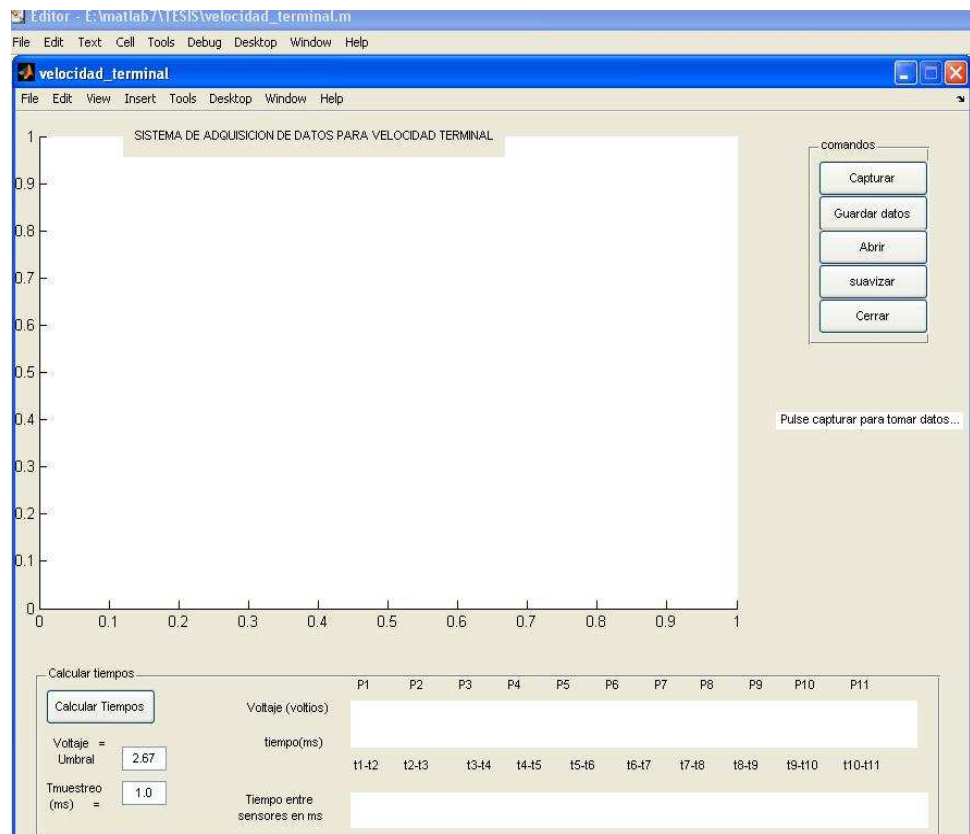



Figura 37. Pantalla menú Inicial Matlab manejo del Software

El botón Capturar lee los datos del puerto serial, estos son almacenados en una matriz de entrada y son guardados en un array para luego ser graficados usando las funciones del MatLab. Para iniciar la transmisión se debe tener habilitado el puerto serial, y luego hacer clic en el botón capturar del MatLab y posteriormente presionar el botón **Po** transmitir del hardware, siempre y cuando se halla verificado, que el hardware este conectado y funcionando. En la pantalla **LCD** al iniciar la transmisión debe aparecer el mensaje TX....., el cual permanece unos segundos mientras se envían los datos al PC para luego de unos segundos más aparecer en pantalla la gráfica de la señal adquirida como se visualiza en la figura 38.

MATLAB¹⁶ es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”. Fue creado por Jack Little y Clever Moler.  quienes vieron la necesidad que tenían los ingenieros y científicos de producir un lenguaje mas avanzado que Fortran o C. Es un programa para realizar cálculos numéricos con *vectores* y *matrices*. Su entorno de cálculo técnico brinda grandes posibilidades para el cálculo numérico: visualización de análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de señales y gráficos, etc. Una de sus grandes ventajas es la de tener entorno fácil de usar. Una de las capacidades más atractivas es la de realizar una amplia variedad de *gráficos* en dos y tres dimensiones. Otra de las herramientas que facilita Matlab es la creación de guis.

GUIDE (Graphical User Interface Development Environment). Es un juego de herramientas que extiende por completo el soporte de MATLAB. Diseñadas para crear GUIs (Graphical User Interfaces) fácil y rápidamente, auxiliando en el diseño y presentación de los controles de la interfaz y reduciendo la labor al grado de seleccionar, tirar, arrastrar y personalizar propiedades.

La forma de implementar las GUIs es crear los objetos y realizar las actividades indicadas. Al usar las Guide para el diseño del menú y graficar la señal adquirida obtendremos dos archivos. Un archivo con la **extensión .Fig** que contiene la descripción de los componentes que posee la Interfase y un archivo con la **extensión .m** que contiene las funciones y los controles del GUI, así como el callback. Un callback se define como la acción que llevara un objeto de la GUI cuando el usuario lo active. Es decir cuando se tiene un botón y el usuario lo presiona ejecutara una serie de acciones a lo que se conoce como callback.

GUIDE esta diseñado para hacer menos tedioso el proceso de aplicación de la interfaz grafica. Una GUI contiene diferentes elementos gráficos tales como: botones, campos de texto, menús, gráficos, etc.

Como se observó en la figura anterior, el modo capturar es el menú que coloca el computador en línea con el hardware diseñado para iniciar la transmisión serial y así poder visualizar en modo gráfico la señal adquirida, con el fin de proceder a realizar su análisis y tomar el valor de los tiempos de muestreo.

¹⁶ http://www.usc.es/gir/docencia_files/tdd/tutorial_matlab.pdf

Gráfica. En el modo capturar se muestra la gráfica en dos dimensiones. En ella se pueden apreciar los valores que han sido tomados. Las gráficas muestran el voltaje pico y el tiempo de muestreo, que es el que interesa en el desarrollo del proyecto.

El pico máximo registra el voltaje pico máximo que se encontró en el proceso y el tiempo máximo de muestreo. Es decir el cruce de la esfera por el sensor en el punto medio de la esfera (lo que se espera).

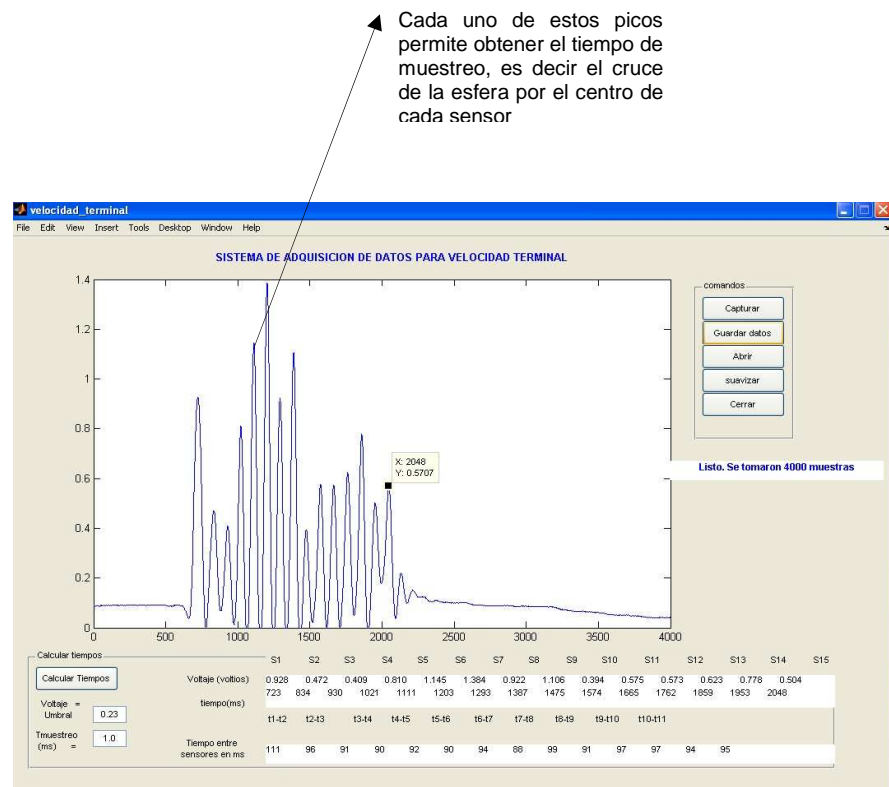


Figura 38. Gráfica de los datos adquiridos con el hardware diseñado

El programa diseñado para graficar la señal adquirida se halla en el Anexo E. programa Matlab.

De esta manera el *software* desarrollado usa lenguajes de programación usuales y de fácil operación, lo que permite una mayor integración de las aplicaciones. Además la posibilidad de portabilidad entre plataformas y computadores..

5. RESULTADOS

Una vez implementado el hardware y programado el microcontrolador se generó una base de datos con las mejores graficas y datos para seleccionar las esferas que determinaban las mejores mediciones, ver anexo I. Base de datos.

Con los resultados encontrados experimentalmente para la velocidad terminal por el método gráfico, se utiliza de manera práctica el teorema de Stokes sobre fluidos, con el fin de determinar el valor de la viscosidad del fluido usado en la práctica como fue la glicerina y el aceite.

El teorema de Stokes expresa lo siguiente: El empuje o fuerza ejercida sobre la esfera por el flujo de un fluido o el del fluido alrededor de la esfera se expresa por $F = 6 \pi \eta r v$, para bajas velocidades y numero de Reynolds muy pequeños ($Re \ll 1$).

De acuerdo a la mecánica de Newton, sobre cualquier cuerpo que cae bajo la acción de la gravedad en el interior de un fluido actúan sobre el tres fuerzas verticales, una que es el peso dirigida hacia el centro de la tierra, otra la resistencia del medio en la misma dirección y sentido opuesto y la otra es la producida por el empuje del fluido conocida como fuerza boyante o de Arquímedes.

$$\begin{aligned} \Sigma F_{\text{neta}} &= ma \\ \Sigma F_{\text{neta}} &= F_g - F_s - F_e = ma \quad (1) \end{aligned}$$

F_g = Fuerza ejercida por la gravedad de la tierra, equivale al peso de la partícula
 F_s = Fuerza viscosa de rozamiento o de Stokes
 F_e = Fuerza de empuje ejercida por el fluido

A medida que el cuerpo avanza la aceleración produce un aumento continuo en la velocidad esto hace que la fuerza de roce viscoso también aumente, este proceso es progresivo hasta que el objeto deja de acelerar en su caída lo que produce un equilibrio de fuerzas, y la ecuación (1) se convierte en:

$$\Sigma F = F_g - F_s - F_e = 0$$

Reemplazando los valores anteriores por sus equivalentes se tiene:

$$(2) \quad \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{\text{líquido}} \cdot g + 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v_l = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho_{\text{esfera}} r^3 \cdot g$$

de donde:

$$\eta = 2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_{\text{esfera}} - \rho_{\text{líquido}}) / 9 \cdot v_l \quad (3)$$

Que es la ecuación utilizada para hallar el valor indirectamente de la viscosidad.

A continuación se presentan algunas tablas y graficas más significativas y los valores hallados, ya promediados de varios lanzamientos de diferentes esferas con su respectivo valor de velocidad y viscosidad.

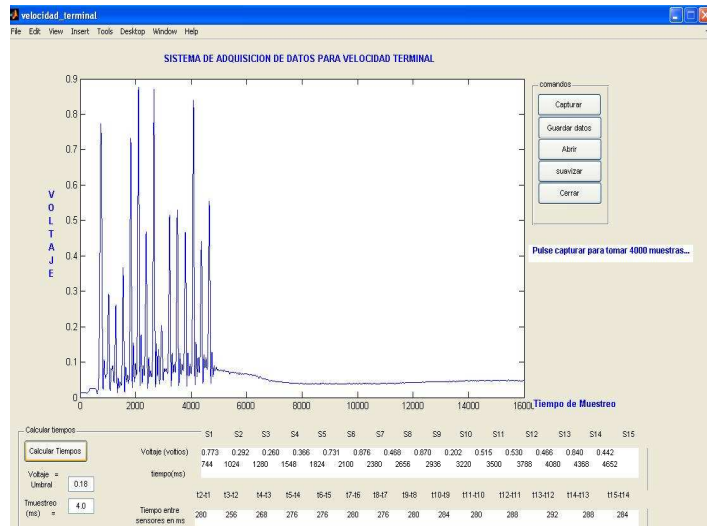
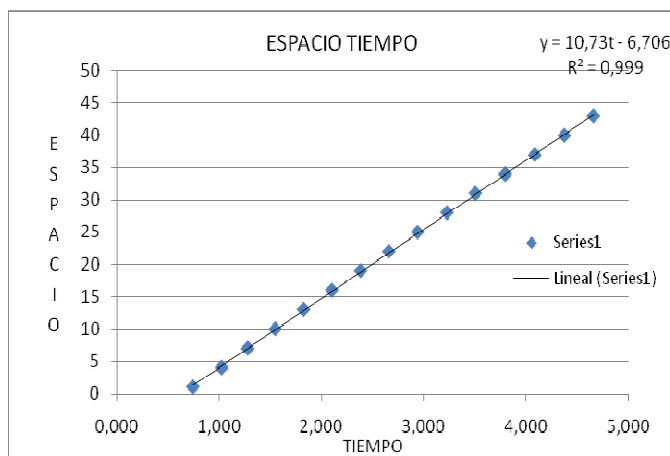


Tabla 1. Datos experimentales de la esfera Pequeña

ESFERA PUNTA NEGRA	
Masa= 0,221g ± 0,001g	
diámetro=8 mm ±0,01mm	
Velocidad = 10,73 cm/s	
Densidad= 2.68 g/cm ³	
Viscosidad= 2,08 g/cm.s	
Tiempo ms	Espacio cm
0,744	1
1,024	4
1,280	7
1,548	10
1,824	13
2,100	16
2,380	19
2,656	22
2,936	25
3,224	28
3,500	31
3,792	34
4,080	37
4,368	40
4,652	43

Figura 39. Señal esfera Pequeña



Gráfica 1. Regresión lineal de esfera pequeña

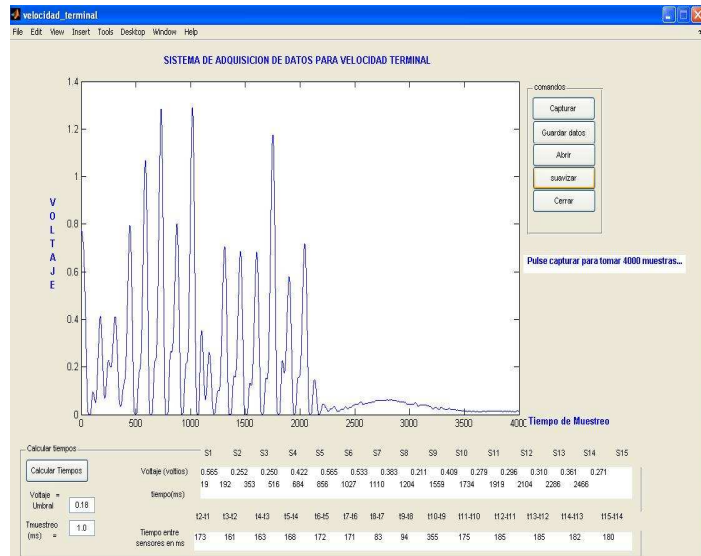
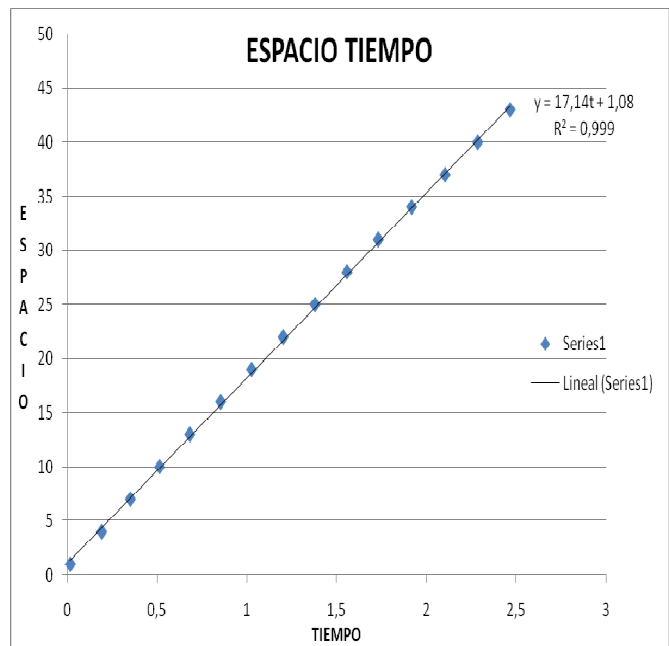


Figura 40 . señal de esfera violetica

Tabla 2. Datos Experimentales esfera violetica

Esfera= Violetica $m=0,705g \pm 0,001g$ Diámetro=7,85 mm Velocidad= 17,14 cm/s Densidad=2,3575 g/cm ³ Viscosidad= 2,37 g/cm s		
Tiempo	Tiempo	Espacio
ms	S	cm
19	0,019	1
193	0,193	4
353	0,353	7
516	0,516	10
684	0,684	13
856	0,856	16
1028	1,028	19
1204	1,204	22
1381	1,381	25
1559	1,559	28
1733	1,733	31
1919	1,919	34
2105	2,105	37
2287	2,287	40
2467	2,467	43



Gráfica 2. Regresión lineal de esfera violetica

Tabla 3. Datos experimentales de la esfera puntas azules

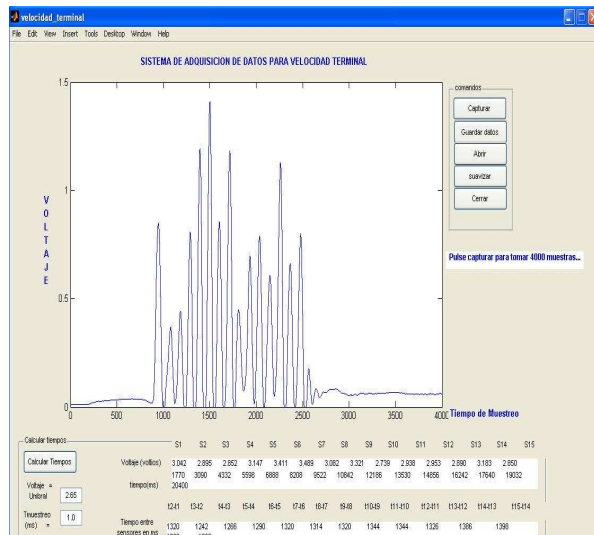
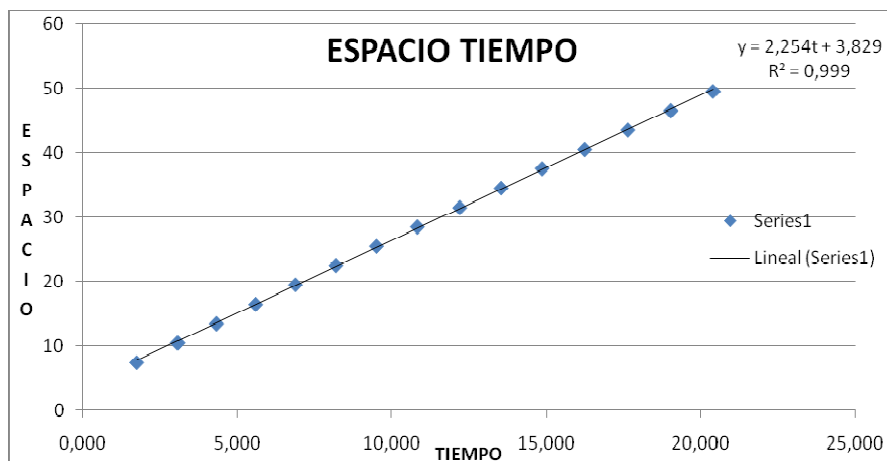


Figura 41. Señal de esfera puntas azules

ESFERA PUNTAS AZULES			
Masa= 1,118g± 0,001g Diámetro= 11,78 mm± 0,1mm			
Velocidad= 2,25 cm/s Densidad= 1,270 g/cm ³			
Viscosidad= 2,020 g/cm s Poises			
TIEMPO	TIEMPO	DELTA t	ESPACIO
mS	S	S	cm
1770	1,770	1,3140	7,5
3084	3,084	1,2420	10,5
4326	4,326	1,2720	13,5
5598	5,598	1,2900	16,5
6888	6,888	1,3140	19,5
8202	8,202	1,3140	22,5
9516	9,516	1,3260	25,5
10842	10,842	1,3480	28,5
12190	12,19	1,3400	31,5
13530	13,53	1,3300	34,5
14860	14,86	1,3800	37,5
16240	16,24	1,4000	40,5
17640	17,64	1,3900	43,5
19030	19,03	1,3640	46,5
20394	20,394		49,5



Gráfica 3. Regresión lineal de esfera puntas azules

La densidad de la glicerina se halló por el método tradicional de pesar un recipiente vacío y luego con glicerina y luego se resta para obtener el resultado.

El valor experimental fue de $\rho = 1.272 \text{ g/cm}^3$, el valor dado por la literatura es de 1.263 g/cm^3

El error relativo porcentual obtenido fue de:

$$\text{Error porcentual} = \frac{\text{Densidad teórica} - \text{Densidad experimental} * 100}{\text{Densidad teórica}}$$

$$\text{Error porcentual} = \frac{|1.263 \text{ g/cm}^3 - 1.272 \text{ g/cm}^3| * 100}{1.263 \text{ g/cm}^3}$$

$$\text{Error porcentual Densidad} = 0.007 \%$$

Este valor permitió trabajar con mayor seguridad para encontrar los valores experimentales de la viscosidad.

Los resultados numéricos hallados con el prototipo se validaron con los resultados obtenidos en ensayos experimentales propios usando un cronómetro, cámara de video y viscosímetro rotacional, al igual que con correlaciones teóricas reportadas en la literatura.

Medida de la viscosidad de la glicerina usando el Viscosímetro rotatorio

Tabla 4. Datos Experimentales adquiridos con viscosímetro rotatorio para glicerina

Distancia 50 cm masa= 6.614 g Peso= $F_g = 6481.7 \text{ g/cm/s}^2$ Temperatura=23°C Velocidad = $V = 7.3 \text{ cm/s}$											
Tiempo s	7.05	6.80	6.94	6.83	6.67	6.91	6.77	6.76	6.86	6.81	Tiempo Promedio 6.84

$$R = 1.9 \text{ cm} , \text{ Torque} = F \times R = 6481.7 \times 1.9 = 12315.23 \text{ g.cm}^2/\text{s}^2 = \tau$$

$$h = \text{Longitud cilindro} = 7.8 \text{ cm}$$

$$F_g = mg = 6.614 \text{ g} \times 980 \text{ cm/s}^2 = 6481.7 \text{ g/cm/s}^2$$

$$\text{Velocidad angular} = \omega = V/R = 7.3 \text{ cm/s} / 1.9 \text{ cm} = 3.84 \text{ rad/s}$$

$$R_2 = 3.0 \text{ cm} \quad R_1 = 2.52 \text{ cm}$$

$\eta = (\tau(R_2 - R_1)) / (2\pi\omega R_1^2 h) = 1231.23 \times (0.48 \text{ cm}) / 2\pi \times 3.84 \times (2.52 \text{ cm})^3 \times 7.8 = 1.96 \text{ g/cm.s}$ o 1.96 Poises, Que aproximadamente equivale a 2.0 Poises
Esfera puntas azules con cronometro

Distancia del recorrido= 42 cm Tiempo promediado= 17,51 s

Velocidad= X/ t V= 42cm/ 17,51s **V= 2,39 cm/s**

Comparable con 2.25 que es la registrada por el prototipo

Esfera pequeña con cronometro

Distancia del recorrido= 21 cm Tiempo promediado= 1,60 s

Velocidad= X/ t V= 21cm/ 1,60s **V= 13,12 cm/s**

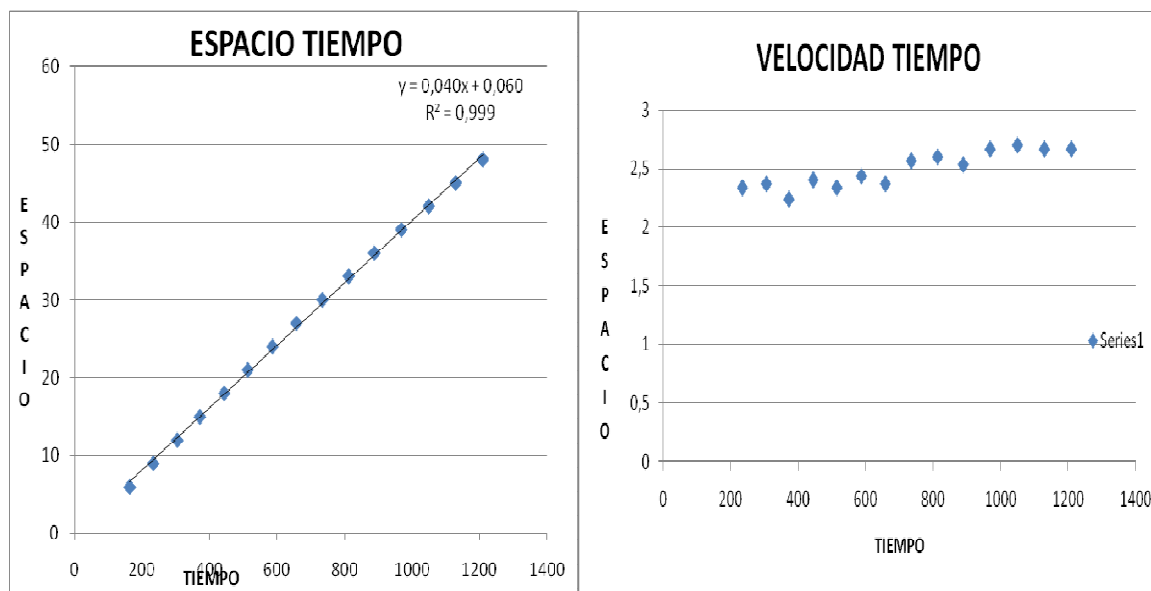
Si se observa en las tablas anteriores, estos valores son muy similares, entre sí, lo que permite expresar :*"los resultados experimentales obtenidos con el prototipo son confiables"*.

En la página siguiente se tienen los resultados de una esfera desplazándose por el interior de la glicerina utilizando un método tradicional como es la cámara de video.

La gráfica de velocidad tiempo, enseña que también se obtiene la velocidad límite, aunque se nota dispersión en los datos, en el Anexo I, se adicionan archivos con pruebas realizadas con diversas esferas.

Tabla 5. Datos Experimentales adquiridos con cámara de Vídeo

ESFERA Nº10			
DIAMETRO= 25,31 mm \pm 0,01mm			
MASA= 10,907 g \pm 0,001g			
		TIEMPO	VELOCIDAD
ESPACIO	TIEMPO	FRAME	frame/ms
cm	s		
6	163	5,438772105	
9	233	7,774441108	2,335669
12	304	10,14347681	2,3690357
15	371	12,37904571	2,2355689
18	443	14,78144811	2,4024024
21	513	17,11711712	2,335669
24	586	19,55288622	2,4357691
27	657	21,92192192	2,3690357
30	734	24,49115782	2,5692359
33	812	27,09376043	2,6026026
36	888	29,62962963	2,5358692
39	968	32,29896563	2,669336
42	1049	35,00166834	2,7027027
45	1129	37,67100434	2,669336
48	1209	40,34034034	2,669336



Gráfica 4. Regresión lineal de los datos obtenidos con la cámara

Finalmente se cambio de fluido. Ya no se utilizó glicerina sino aceite de auto Spirax 80W- 90, lubricante de eje y transmisión manual.

Para las pruebas hechas con balines de diámetros pequeños en el aceite se muestran valores mucho mas confiables que en la glicerina. Ya que los cálculos demuestran que el valor obtenido de la viscosidad se acerca mucho al suministrado por el fabricante (ver Anexo H.) y más aun al calculado experimentalmente con un viscosímetro rotacional del laboratorio de Ciencias Básicas de la UTP, el cual suministro un valor de **6.84 Poise** para la viscosidad del aceite 80 W 90. El error experimental calculado con un balín de 6mm de diámetro y una masa de 1.100 g es del **15.78 %** lo que garantiza que el prototipo diseñado proporciona datos confiables para los propósitos pedagógicos en la enseñanza del tema.

MEDICION DE VISCOSIDAD POR EL METODO DE ROTACION: UTILIZANDO COMO FLUIDO EL ACEITE Spirax 80W-90

Tabla 6. Datos experimentales adquiridos con viscosímetro rotatorio para Aceite Spirax 80 W-90

Distancia 50 cm masa= 49.026 g Peso=mg = Fg=48055 g cm/s ² Temperatura=21°C Velocidad =V= 15.53 cm/s											
Tiempo s	3.14	3.25	3.331	3.32	3.24	3.07	3.15	3.27	3.14	3.29	Tiempo promedio 3.22

$$R=1,9 \text{ cm} , \text{ Torque} = F \times R = 91286.5 \text{ g.cm}^2/\text{s}^2 = \tau$$

$$\text{Velocidad angular} = \omega = V/R = 8.17 \text{ rad/s}$$

$$R_2 = 3 \text{ cm} \quad R_1 = 2.52 \text{ cm}$$

Cálculo de La viscosidad η para este aceite

$$\eta = (\tau(R_2-R_1)/(2\pi\omega R_1^2 h)) = \mathbf{6.84 \text{ g/cm.s} \text{ o } 6.84 \text{ Poises}}$$

MEDICION DE VISCOSIDAD USANDO EL PROTOTIPO DISEÑADO

Tabla 7. Datos Experimentales
Obtenidos en aceite 80W-90 usando como esfera un balón

Balín de acero	
Diámetro = 6 mm $\pm 0,01$ mm	
masa= 1,10g $\pm 0,001$ g	
Densidad= 9.73 g/cm ³	
Viscosidad= 5.76 g/cm s	
Aceite 80W90	
Tiempo	Espacio
ms	cm
495	1
607	4
704	7
799	10
895	13
990	16
1084	19
1184	22
1265	25
1381	28
1477	31
1560	34
1681	37
1778	40
1877	43

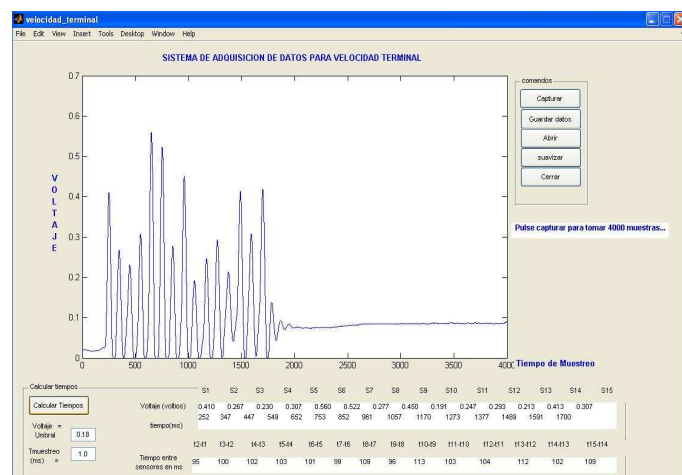


Figura 42. Señal del balón en Aceite 80 W-90



Grafica 5. Regresión lineal del balón en aceite

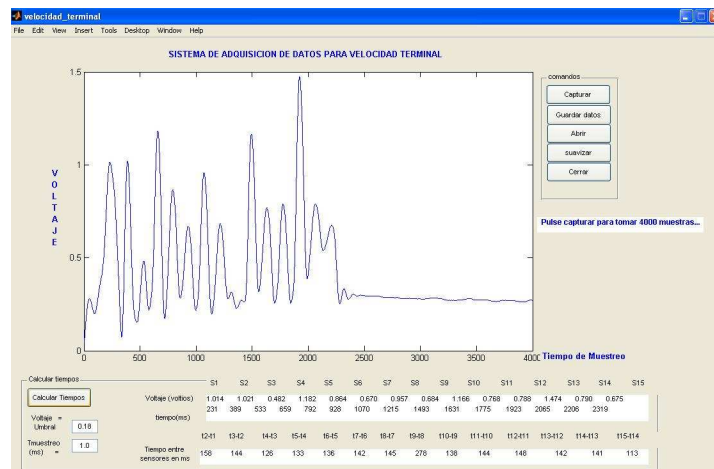
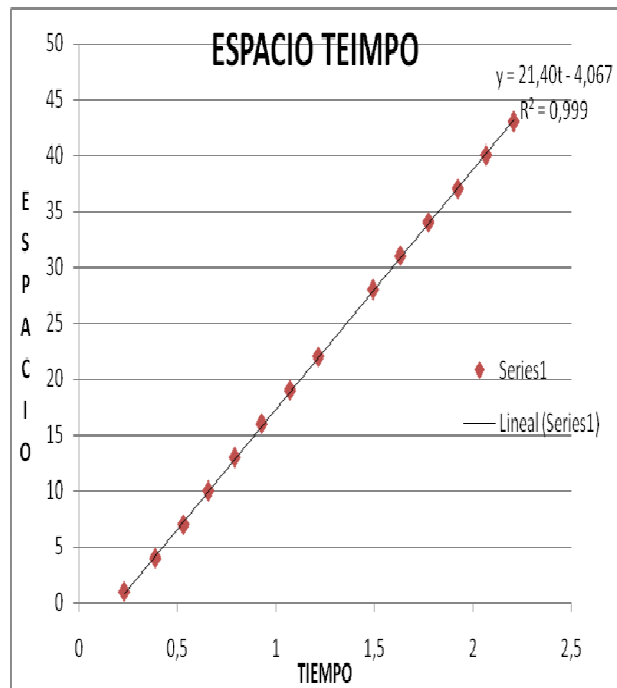


Figura 43. Señal de la esfera café oscura

Tabla 8. Datos Experimentales de la esfera café oscura

Esfera café oscura		
masa= 3,582g ± 0,001g		
D=14.45 mm ±0,01mm		
Velocidad= 21.40 cm/s		
Densidad=2.2699 g		
Viscosidad= 7.31 g/cms		
232	0,232	1
389	0,389	4
533	0,533	7
658	0,658	10
792	0,792	13
927	0,927	16
1070	1,07	19
1215	1,215	22
1354	1,354	25
1493	1,493	28
1632	1,632	31
1774	1,774	34
1923	1,923	37
2066	2,066	40
2206	2,206	43



Gráfica 6. Regresión lineal de la esfera café oscura

Otro de los métodos usados consistió en realizar la simulación encontrada en la página Web: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/stokes/stokes.html#Descripci%F3n>. de Ángel Franco “Formula de Stokes”, en esta simulación se usaron los datos hallados experimentalmente para la viscosidad y la densidad de las esferas tanto para la glicerina como el Aceite de caja y transmisión Spirax 80W-90.

Simulación de la caída del balón en aceite 80W – 90 con un radio de 6mm y masa= 1,10g para una densidad es 9.73 g/cm³

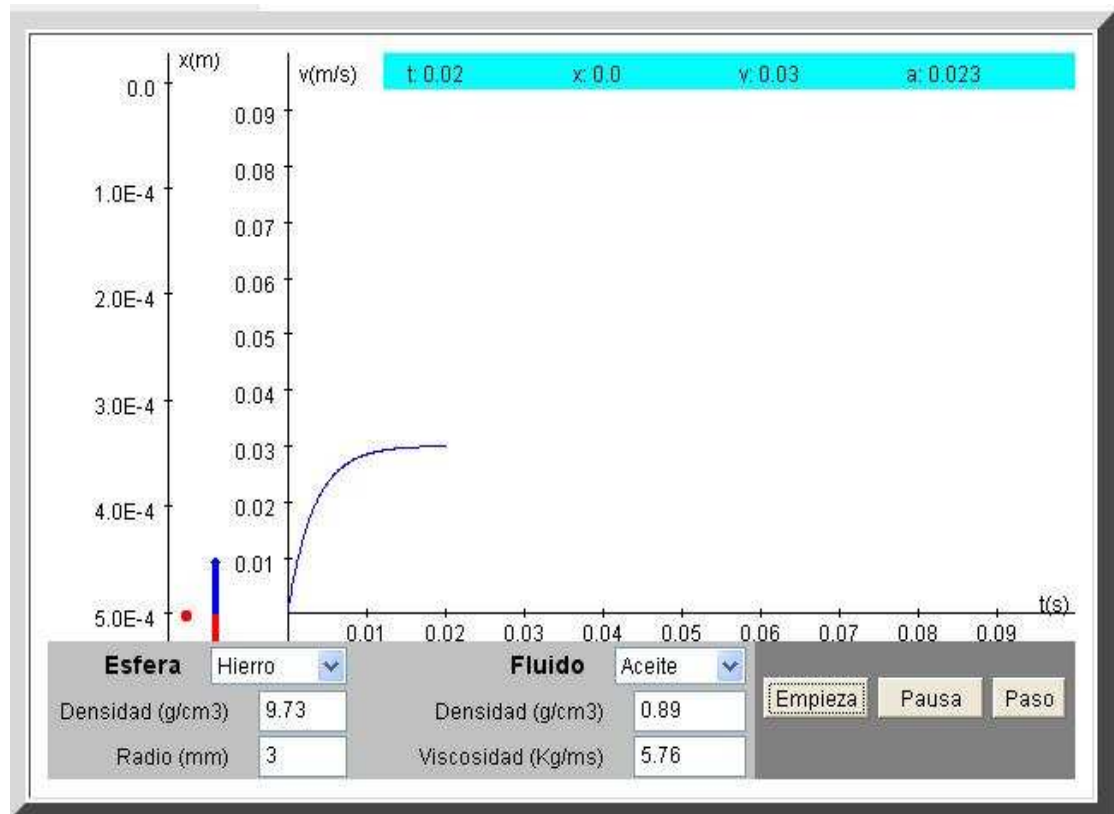


Figura 44. Simulación de la caída del balón usando Stokes

Si se observa la simulación se nota cual es el espacio recorrido por la esfera, para adquirir la velocidad limite.

Simulación de la caída de la esfera pequeña en glicerina con un radio de 8mm y masa=0.221 g para una densidad de 2.68 g/cm³.

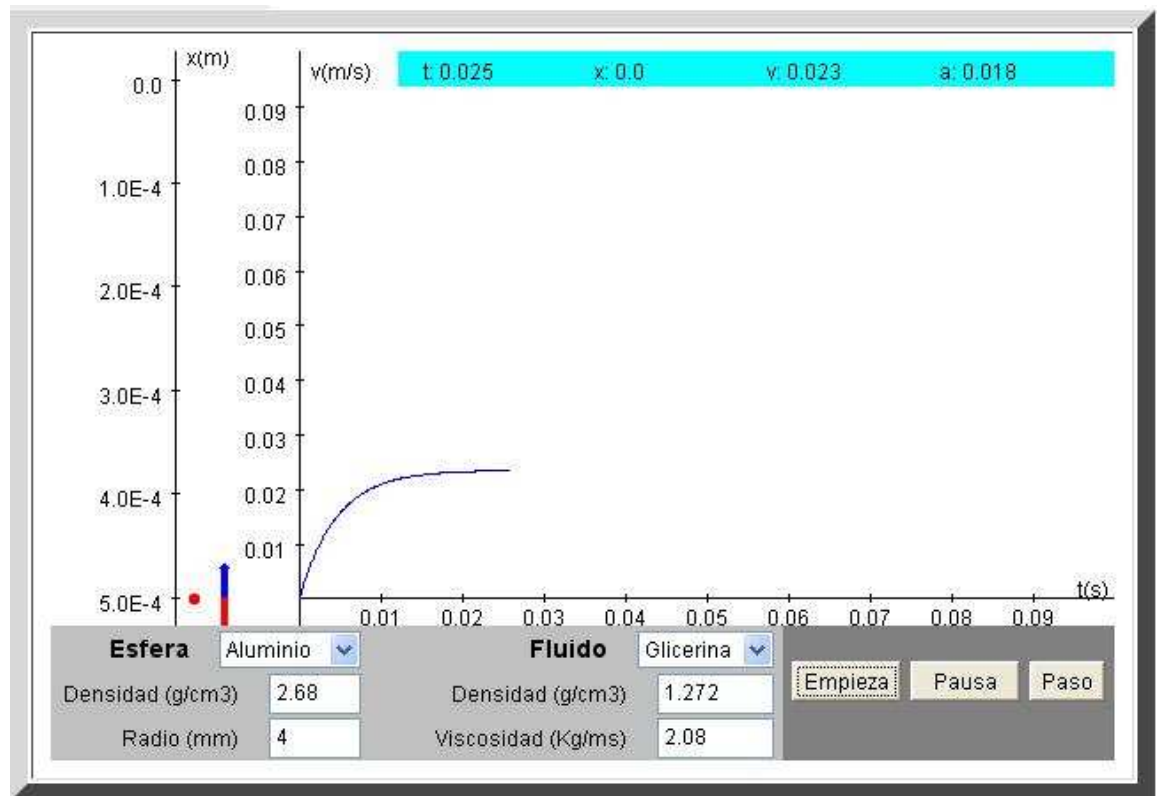


Figura 45. Simulación de la caída de la esfera pequeña usando Stokes

5.1 PRUEBAS AL SISTEMA

Las pruebas fueron realizadas usando diferentes materiales y diámetros de esferas. Se lograron puntos dónde el sensor tuvo su mayor detección, lo que se puede visualizar al observar las diferentes gráficas obtenidas. Esto permitió que el programa en Matlab funcionara perfectamente, entregando el tiempo de muestreo correctamente; y a la vez posibilitó obtener líneas rectas casi perfectas.

5.2 PRUEBAS DE REPETIBILIDAD

Las múltiples pruebas que se le hicieron al sistema posibilitaron verificar la funcionalidad de los sensores, estudiar los datos y graficar los resultados. Al

analizar los datos se comprobó que los resultados son aceptables y confiables.

Las pruebas realizadas bajo las mismas condiciones indican que el sistema responde de la misma forma a pruebas idénticas (la misma posición de lanzamiento, temperatura, densidad del fluido y densidad de la esfera). Aunque no se logran obtener los mismos valores de tiempo si se obtienen similares valores para la velocidad, lo que permite asegurar resultados en la repetibilidad de la medición.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de 10 lanzamientos para el balón de , Diámetro= 6mm $\pm 0,01$, masa =1,100g $\pm 0,001$ g en aceite 80W-90.

Tabla 9. Medida de tiempos para 10 lanzamientos con un balón

Espacio	tiempo1	tiempo2	tiempo3	tiempo4	tiempo5	tiempo6	tiempo7	tiempo8	tiempo9	tiempo10
cm	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
1	731	139	468	114	1213	37	285	24	298	529
4	840	242	575	214	1318	142	395	128	400	659
7	940	348	677	321	1423	245	497	232	502	758
10	1038	447	775	419	1521	343	595	332	601	857
13	1136	545	874	517	1621	440	693	430	700	956
16	1234	644	973	615	1718	539	792	529	800	1055
19	1330	742	1069	713	1814	634	888	627	896	1151
22	1433	845	1174	814	1918	738	992	729	1003	1256
25	1534	942	1275	915	2019	839	1093	831	1105	1359
28	1635	1048	1377	1015	2120	939	1194	932	1206	1461
31	1732	1149	1477	1114	2219	1038	1294	1032	1307	1560
34	1835	1248	1581	1215	2324	1142	1397	1136	1412	1664
37	1939	1356	1686	1320	2426	1245	1500	1240	1517	1767
40	2039	1457	1787	1420	2527	1345	1601	1340	1618	1869
43	2141	1559	1891	1522	2628	1447	1703	1443	1721	1971
Velocidad										
Limite	29,95	29,68	29,65	29,93	29,79	29,91	29,78	29,71	29,54	29,51

El promedio de la velocidad límite equivale a **29,745 cm/s \pm 0.049 cm/s**, lo que permite deducir que las variaciones son muy pequeñas, lo que muestra que se han obtenido valores repetibles de esta.

Otra prueba realizada fue la de variar la distancia de lanzamiento de las esferas al primer sensor. Se logró comprobar que esto no afectaba la forma de la gráfica, siempre se obtiene una línea recta.

5.3 ANALISIS DE DATOS

Realizando el análisis de datos en base a los resultados entregados por el prototipo diseñado, se obtuvieron diversos valores de velocidad límite y de viscosidad, utilizando masas esféricas de diferente radio y diversas densidades.

Se obtuvo una gran concordancia entre los valores experimentales que resultaron al medir la viscosidad del aceite de motor utilizando esferas de diferentes materiales y diámetro con los realizados en las otras prácticas realizadas y de la literatura existente para esto.

Para cada esfera se obtiene un valor de velocidad terminal que permite calcular la viscosidad del fluido. Este experimento se realiza sucesivas veces para esferas del mismo material y diámetros similares, obteniéndose en cada caso un valor de viscosidad y realizándose luego un promedio de dichos valores.

El procedimiento descrito se repite utilizando esferas de diversos materiales y diámetros, así como para diferentes fluidos.

Comprender con facilidad que la fuerza de roce que se opone al movimiento es mayor, mientras mayor sea la rapidez del movimiento.

El estudio se hace para fluidos ideales, ya que con fluidos reales presentan mayor complejidad.

Para detectar el paso de la esfera, la misma debe cruzar por los sensores, pues de lo contrario la señal es tan pequeña que no logra ser detectada por el dispositivo diseñado para sensar su paso. Si el objeto está por fuera del área de detección máxima el valor que se capture será errado y la señal no será bien definida, lo que no permite tomar medidas de tiempo.

Las múltiples pruebas que se le hicieron al sistema posibilitaron verificar la funcionalidad de los sensores, estudiar los datos y graficar los resultados. Al analizar los datos se comprobó que los resultados son aceptables y confiables.

5.4 DIFICULTADES ENCONTRADAS EN EL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

- ☑ Se efectuaron múltiples reformas al diseño original del dispositivo ya que la fluctuación de la señal es demasiado pequeña del orden de los milivoltios y ha sido necesario amplificarla de tal manera que se pueda llevar al sistema de adquisición de datos.
- ☑ La señal se ha visto afectada de fluctuaciones al azar significativas, lo que genera realizar variaciones tanto en el hardware como en el software.
- ☑ Debido al problema anterior fue necesario hacer un nuevo diseño del circuito para el acondicionamiento de la señal.
- ☑ Cuando se diseñaron los circuitos, se hizo la respectiva simulación, además se le realizaron las pruebas al circuito ya montado en el protoboard con señales puras como la producida por un frecuencímetro o el generador de señales, y los registros mostraron que el circuito responde de manera perfecta y da respuestas positivas, pero cuando se probó con el panel de sensores, se percibieron fluctuaciones inesperadas, esto retrasó la entrega del proyecto ya que al enviarse la muestra al computador y recibirse en la interfaz gráfica de Matlab se presentaron dificultades ya sea con la gráfica de la señal o con los valores del tiempo de muestreo.
- ☑ Se detectó que los factores que ocasionan las fluctuaciones inesperadas fueron los siguientes:
- ☑ Si los sensores no han sido bien alineados las muestras no son bien registradas lo que presenta problemas en la detección de los picos por la rutina de Matlab.
- ☑ Luego de muchas pruebas al sistema se comprobó que la respuesta que brindan cada uno de los sensores no es uniforme debido a sus características propias de fabricación.
- ☑ Algunos sensores dejan de funcionar en cualquier momento o no brindan una señal aceptable por lo que ha sido necesario revisarlos uno a uno con el fin de detectar a cuál corresponden los cambios.

- ☑ El desplazamiento de la esfera no siempre es coaxialmente por el tubo esto hace que no se produzca un buen sentido del movimiento, es decir hay sensores que no registran el movimiento o lo hacen de una manera muy leve lo que debilita la señal, se trato de corregir el lanzamiento usando un embudo pero no dio el resultado esperado, así que se suprimió este cambio, y se le instalo una pinza en el centro del tubo con el fin de corregir este inconveniente
- ☑ La luz externa afectaba los receptores (FTR), se ha hecho una variación en el circuito para evitarlo se deja a opción del usuario el tomar o no la señal con filtrado, además se coloco una cubierta protectora en acrílico,
- ☑ El fluido que se uso para la mayor parte de las pruebas fue la glicerina, este liquido por su alta viscosidad demostró en múltiples pruebas que la velocidad limite se adquiere casi inmediatamente, (es correcto según lo muestra la literatura consultada al respecto) es decir a los pocos milímetros de su lanzamiento lo que no permitió construir la grafica de $V \propto t$ como aparece en los textos de física, con la curva característica antes de llegar a su velocidad terminal.
- ☑ Una de las mayores dificultades encontradas al inicio del diseño fue hallar la esfera con la densidad y el radio adecuado para que se lograra visualizar el fenómeno expuesto en el punto anterior, hasta lograr deducir a través de innumerables prácticas que por la forma como se adquiere la señal en los sensores no era posible lograrla.
- ☑ El no contar con los instrumentos como osciloscopio, frecuencímetro, programador de Pic en el lugar de trabajo para realizar las pruebas respectivas de señal, fue otra de las causas del retraso del proyecto.
- ☑ La rutina diseñada en Matlab para calcular los tiempos funciona perfectamente si la señal en su transcurso no sufre de fluctuación alguna.
- ☑ Como no es posible garantizar una señal pura libre de interferencias no siempre la rutina de Matlab responde acertadamente para el valor de los tiempos, por lo que ha sido posible utilizar de manera directa el μC para tomar los tiempos es decir de manera digital solo esta funcionando la parte analógica que el sistema de adquisición de datos entregue datos confiables en la medida directa de los tiempos, este análisis se

hace desde la interfaz grafica de Matlab. Se concluyo que es una manera didáctica para que el alumno obtenga los tiempos manualmente y así pueda aclarar conceptos y visualice mucho mejor el fenómeno para realizar sus conclusiones.

Este diseño con sensores ópticos nos permitió concluir que siempre habrá que realizar mejoras al circuito para optimizarlo cada vez mas (en el documento final se dejan las mejoras que se le pueden realizar al prototipo en general).

En la realización de esta práctica se hacen las siguientes suposiciones:

- el fluido se mantiene en régimen laminar cuando la esfera se desplaza a través del fluido.
- Las esferas son completamente esféricas
- La luz externa no influye sobre los sensores
- El valor de la aceleración de la gravedad se considera constate en un valor de $(978 \pm 5) \text{ cm/s}^2$
- La densidad del material ρ_e es el producto de la masa por el volumen de la esfera de radio R .
- La densidad del material se considera uniforme
- La fórmula de Stokes tiene un rango de validez que se asume valido para esta práctica.
- El valor del número de Reynolds es el ideal para el tipo de flujo generado. Es posible que la viscosidad de la glicerina utilizada en la experiencia se haya visto afectada por la absorción de humedad, dada la higroscopicidad de este fluido.

RECOMENDACIONES

- ★ En este trabajo se ha presentado el desarrollo de un prototipo pedagógico para la enseñanza de uno de los temas importantes de la física, el que tiene que ver con la velocidad límite de un cuerpo que se desplaza en un fluido viscoso. El prototipo está constituido por un hardware y un software, diseñados con el propósito de que la experiencia intelectual que permite haga parte de la programación de los laboratorios en física en ciencias básicas. El prototipo tiene una interfaz que posibilita variar el tiempo de muestreo, usando circuitos electrónicos básicos, con el fin de obtener medidas de las señales tomadas por los fotosensores y alcanzar así datos confiables. Para su utilización en los laboratorios de física es conveniente tener en cuenta las siguientes recomendaciones.
- ★ Es necesario que el equipo de medición esté bien calibrado y se realicen pruebas con anterioridad a las prácticas.
- ★ Es de gran ayuda realizar la práctica con previos conocimientos teóricos del comportamiento de cuerpos esféricos en fluidos. Esto significa que, el estudiante debe consultar los estudios ya hechos sobre la viscosidad del fluido a tratar, para saber si su experimento se está llevando a cabo de la manera esperada.
- ★ Equipar cada emisor y detector con un lente para facilitar la proyección y recepción de la luz infrarroja en un área inmediatamente ubicada sobre cada par emisor –detector, también es aconsejable.
- ★ El sensor presenta una mejor detección si se utilizan esferas que pasen por su campo de visión, es decir como mínimo deben tener 3mm de radio y una densidad mayor a la del fluido.
- ★ Aunque el desempeño del sistema radica en el sensor, algunas modificaciones en el hardware podrían mejorar el desempeño del sistema. Como por ejemplo el mecanismo de lanzamiento de la esfera.
- ★ Un trabajo futuro será modificar el contenedor del fluido por un tubo de acrílico para implementar un vaciado y llenado más eficiente.
- ★ Es recomendable mejorar el sistema de visualización colocando luz para el LCD y aumentar su tamaño visual.

★ Por otro lado, es necesario mejorar en la Facultad de Ciencias Básicas de la UTP, en especial en la Maestría en Física, los procesos metodológicos de investigación para poder así realizar los proyectos en menor tiempo. Se sugiere también que las clases de Física pasen al plano del trabajo práctico para los cual se pueden utilizar los recursos de la Facultad de Ciencias Básicas.

★ Finalmente, se recomienda continuar brindando el apoyo necesario a las líneas de investigación en Instrumentación y Control en Ciencias Físicas, con el fin de impulsar proyectos desarrollados a bajo costo que pueden redundar en beneficios institucionales. Asimismo, orientar parte de los trabajos de grado futuros a la continuidad de las líneas de investigación que llevan un recorrido significativo, para implementar dispositivos específicos de acuerdo con las necesidades institucionales.

CONCLUSIONES

- ★ El diseño y desarrollo de este prototipo es un punto de partida para enriquecer el campo de la instrumentación y control en la U.T.P, pues permite la aplicación de tecnología de avanzada en el aprendizaje de la física. Los aportes realizados a través de la construcción del prototipo son numerosos: se potencia la toma de datos, el ordenamiento y análisis de los resultados experimentales, la aplicación de la información obtenida a la resolución de problemas y el trabajo con equipos que incorporan y procesan información, como son los sensores.
- ★ Con el prototipo construido, el estudiante puede realizar prácticas de caracterización de los tiempos y hacer análisis estadístico de datos, con el fin de calcular las incertidumbres de una variable. También es posible inferir hipótesis y observar como varía la velocidad de un cuerpo a través de un fluido.
- ★ Los porcentajes de error relativo fueron bajos, en comparación con los obtenidos en las otras prácticas experimentales y con los modelos teóricos. La desventaja de usar el prototipo en comparación con los modelos teóricos radica en que no se pudo medir milimétricamente el tiempo de muestreo para encontrar todos los valores necesarios para construir en forma completa la curva de comportamiento. Sin embargo, el instrumento diseñado permite representar los datos experimentales de una mejor manera que los datos hallados con otros instrumentos, los cuales no posibilitan hacer un seguimiento del desplazamiento de la esfera a través del fluido.
- ★ Se diseñó un sistema confiable y relativamente seguro, que proporciona información y datos al usuario para tener una buena apreciación de la velocidad límite.
- ★ El trabajo previo a la elaboración del prototipo, la recopilación bibliográfica y los procesos de conceptualización, así como los diseños teórico y preliminar, fueron de gran importancia. Tomaron bastante tiempo y demandaron un gran esfuerzo por parte del equipo.
- ★ Como uno de los resultados de la investigación se puede concluir que la densidad y tamaño de la esfera es determinante para que se produzcan

cambios en su velocidad: si hay un área mayor, mayor será la resistencia que ofrece el fluido a su desplazamiento. Igualmente, la tasa de aumento en la velocidad es mayor a medida que la temperatura se eleva. Covarianza que se debe a que el estado del fluido es menos viscoso y hay mayor libertad de la esfera para caer.

★ A través del prototipo construido y la experiencia diseñada, se lograron obtener valores de velocidad límite confiables.

★ Por último, es indispensable subrayar que a través del proyecto de investigación, se demostró que es posible desarrollar un sistema altamente confiable y eficiente a muy bajo costo, incluyendo características que otros sistemas, de mayores costos, no tienen, como es sensar con tiempo de muestreo.

BIBLIOGRAFIA

ALONSO, Marcelo. Física, Mecánica, Ed. Fondo educativo Interamericano,s.a., Madrid, 1976, páginas 173, 174.

BERTIN, JOHN J. Mecánica de fluidos para ingenieros. Prentice may Hispanoamericana S.A. 1984.

FISHBANE, Paul M. GASIOROWICZ. Stephen. Física para ciencias e ingeniería. Volumen I. Prentice-Hall Hispanoamericana. México. 1994.

GONZÁLEZ, José Adolfo, *Introducción a los Microcontroladores de 16bits*, McGraw Hill, 1993.

GUTIÉRREZ, Juan Luis. “Física y Química”, Ed. Nauta, s. a., Barcelona, 1992, Páginas 52, 68.

HALLIDAY, David, RESNICK Robert. Física I y II. Compañía editorial continental. Mexico. 1978.

HALLIDAY, David. Física para estudiantes de ciencias e ingeniería. Compañía Editorial Continental . Mexico

HEWITT, Paul G. Física Conceptual. Addison Wesley Longman. 2da Edición. 1998.

HUGHES, William, BRIGHTON John A. Teoría y problemas de dinámica de fluidos. McGraw Hill. 1970.

L. LANDAU Y E. Lifchitz. “Mecánica de los Fluidos”. Tomo 6. Editorial Mir.

L. MOTT ROBERT. Mecánica De Fluidos Aplicada. Prentice-Hall Hispanoamericana . 6ª edición.2006.Págs 221 a 537.

MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Harper & Row Publisher. 1970.

MOTOROLA CMOS LOGIC DATO, series c. Motorola INC., 1981 previous edition .printed U.S.A.

R.V. Giles, J.B. Evett y C. Liu. “Mecánica de los Fluidos e Hidráulica”. McGraw-Hill. 1994.

SALDARRIAGA. Juan G. Mecánica De Fluidos. Mcgraw-Hill Interamericana S.A. 3ª Edición.

SHAMES, Irving H. Mecánica De Fluidos. Mcgraw-Hill Interamericana S.A. 3ª. Edición.

SEARS, Francis W. Fundamentos de Física I. Colección Ciencia y Técnica, Aguilar. 1967.

SERWAY, Raymond A. Física Tomo I. McGraw-Hill. Cuarta edición. 1990

SERWAY, Raymond A. Física Tomo II. McGraw-Hill. Cuarta edición. 1990

STREETER L., Victor, Wylie Benjamin. Mecánica de fluidos. Mcgraw-Hill Latinoamericana S.A. Bogotá Colombia. 1979.

S. KONDRAT'EV, E. A. Naumova, Calculation of the Velocity of Free Settling of Solid Particles in a Newtonian Liquid, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, Volume 37, Issue 6, November - December 2003, Pages 606 – 612.

Páginas Web

Caída de Los Cuerpos en Fluidos. “Física para ciencias de la vida”, Ed. McGraw-Hill, España, 1986, paginas 85, 87, 88. Internet: <http://www.castillayleon.com/cultura/cientificos/stokes.htm...y>
www.scribd.com/doc/14232771/P43-Caida-de-Los-Cuerpos-en-Fluidos -

CAPISTRAN Jesús, “to Proyecto- Viscosímetro de Caída de Bola- at” 4/20/2006 10:57:00 AM. Publicado por Capis. Internet : <http://capistran.blogspot.com/2006/04/proyecto-viscociometro-de-caida-de-bola.html>. Acceso el 2 de febrero de 2008.

Christian Muñoz V., Marcela A. Cruchaga y Diego J. Celentano, “modelación del movimiento de un cuerpo rígido en un medio viscoso”. Internet: www.fain.uade.edu.ar/mecom2005/SESSION1/cmuñoz.pdf .acceso: febrero 10 de 2008.

Dancausa Javier, Soria-Ruiz Leticia, Enríquez Héctor, Senda rubias Miguel Ángel. *Laboratorio de Mecánica. Técnicas Experimentales I. Facultad de CC. Físicas. UCM. Curso 02/03. Viscosímetro de Stokes.*

Débora Leibovich, María Cecilia Molas y Florencia Rodríguez Riou, Facultad de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales Universidad Favaloro, de Buenos Aires, Argentina." Análisis de la velocidad de cuerpos esféricos en sustancias viscosas". http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_termo/ley_stokes.pdf. Acceso 10 de septiembre de 2006.

Diodo Led. "Artículo de la Enciclopedia Libre Universal en Español", internet: http://enciclopedia.us.es/index.php/Diodo_LED. Acceso marzo 6 de 2009.

Facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura. Escuela de formación básica Departamento de física y química Física ii – termodinámica. "Trabajo práctico: Viscosidad". Internet: www.fceia.unr.edu.ar/fisica2bas/termodinamica/Laboratorios/viscosidad.pdf. Acceso: abril 17 de 2009.

Física aplicada: técnicas experimentales básicas, práctica Nº 9. Medida de la viscosidad por el método de Stokes. Internet: www.ugr.es/~andyk/Docencia/TEB/Guiones/09.doc. Acceso marzo 14 2004.

FRANCO GARCIA, Ángel, "Física con ordenador: Fórmula de Stokes". Internet: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/stokes/stokes.html>. última actualización febrero de 2009. Acceso el 10 julio 2008.

Guía del trabajo práctico de Laboratorio. "VISCOSIDAD". En; <http://www.ull.es/publicaciones/latina/aa2000kjl/u36di/03zalcborg.htm>. Acceso el 5 de abril 2007

LDI FIISA. LD Didactic GmbH Leyboldstrasse 1 D-50354 Huerth / Germany, "Montaje de un viscosímetro de caída de bola para determinar la viscosidad de líquidos viscosos", internet: http://www.ld-didactic.de/literatur/hb/s/p1/p1831_s.pdf. acceso: marzo 5 de 2007.

Mordant Nicolas and Pinton Jean-Francois Velocity measurement of a settling sphere. Ecole Normale Sup_erieure de Lyon, Laboratoire de Physique. THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B. EDP Sciences Societ_a Italiana di Física Springer-Verlag 2000 Internet : http://perso.ens-lyon.fr/jean-francois.pinton/ARTICLES/turb_settlingEPJ.pdf.

Optoelectrónica, Dispositivos optoelectrónicas básicos, .internet: <http://www.info-ab.uclm.es/labeledc/solar/Componentes/OPTOELECTRONICA.html#3544>. Acceso: marzo 9 de 2009.

R. Cárdenas, G. Chaparro*, y F. Fajardo," ESTUDIO DE LA LEY DE STOKES",REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA, VOL. 36, No. 1. 2004. Ddepartamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. 2003. Internet: http://calima.univalle.edu.co/revista/Vol36_2/articulos/pdf/3602272.pdf.

Shan-tarng Chen Department of Physics, National Chung-Hsing University,Taichung, Taiwan 402, R. O. C. The Resistive Force on a Sphere with a String Moving in a Viscous Fluid. CHINESE JOURNAL OF PHYSICS VOL. 32, NO. 4 AUGUST 1994. Internet: www.psroc.phys.ntu.edu.tw/cjp/download.php?d=1&pid=795.acceso: abril 15 2006.

Tutorial Matlab, internet:http://www.usc.es/gir/docencia_files/tdd/tutorial_matlab.pdf. acceso: enero 8 de 2009-05-15.

Universidad de San Martin, Chile. Experimentos virtuales, "Roce viscoso", internet: www.experimentos.cl, acceso: agosto 2005

Universidad de Antofagasta , facultad de ingeniería depto. Ingeniería mecánica, "Viscosidad de fluidos, Mecánica de fluidos. Fórmula de Stokes, laboratorio n° 1 viscosidad". Internet: <http://html.rincondelvago.com/viscosidad-de-fluidos.html>.

Ventus ciencia experimental, experimentos de física universitaria, "viscosímetro de bola", internet: www.ventusciencia.com. acceso abril 18 2006.

WATSON L. Vargas a, Lyda M. Pineda y Carlos A. Riaño. Sedimentación de una esfera en un cilindro vertical con paredes de radio variable Facultad de Ingeniería Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia. Internet: http://www.umng.edu.co/www/resources/r15_10.pdf. acceso abril 10 de 2006.

ANEXOS.

ANEXO A. GUIA DEL USUARIO

GUIA DEL USUARIO

VELOCIDAD LIMITE EN FLUIDOS



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
MAESTRIA EN INSTRUMENTACION FÍSICA
PEREIRA

2009

CONTENIDO

	Pág.
1. DERECHOS DE IMPRESIÓN	83
2. CARACTERISTICAS TECNICAS DEL DISEÑO	84
3. COMPONENTES DEL EQUIPO	84
4. MONTAJE	85
4.1 PARTES DE REEMPLAZO	87
5. DESCRIPCION DEL SISTEMA	88
6. MANTENIMIENTO	92
7. REQUERIMIENTOS ESPECIFICOS PARA EXPERIMENTOS	95
8. RECOMENDACIONES	96
9. POSIBILIDADES DE DEMOSTRACION	98
10. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO VELOCIDAD LIMITE	100
10.1 OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA	101
10.2 INDICACIONES PARA INICIAR SESIÓN DE TRABAJO EN VELOCIDAD LÍMITE	102
10.3 INSTALACION DEL SOFTWARE	103
10.4 INICIANDO LA SESIÓN DE TRABAJO EN MATLAB	104
10.5 CONFIGURANDO EL HARDWARE	109

	Pág.
10.5.1 Configuración del software del microcontrolador	109
10.6 ¿CÓMO MEDIR EL TIEMPO?	112
10.7 ¿CÓMO GRAFICAR LOS DATOS ?	113
10.8 ANÁLISIS GRÁFICO	114